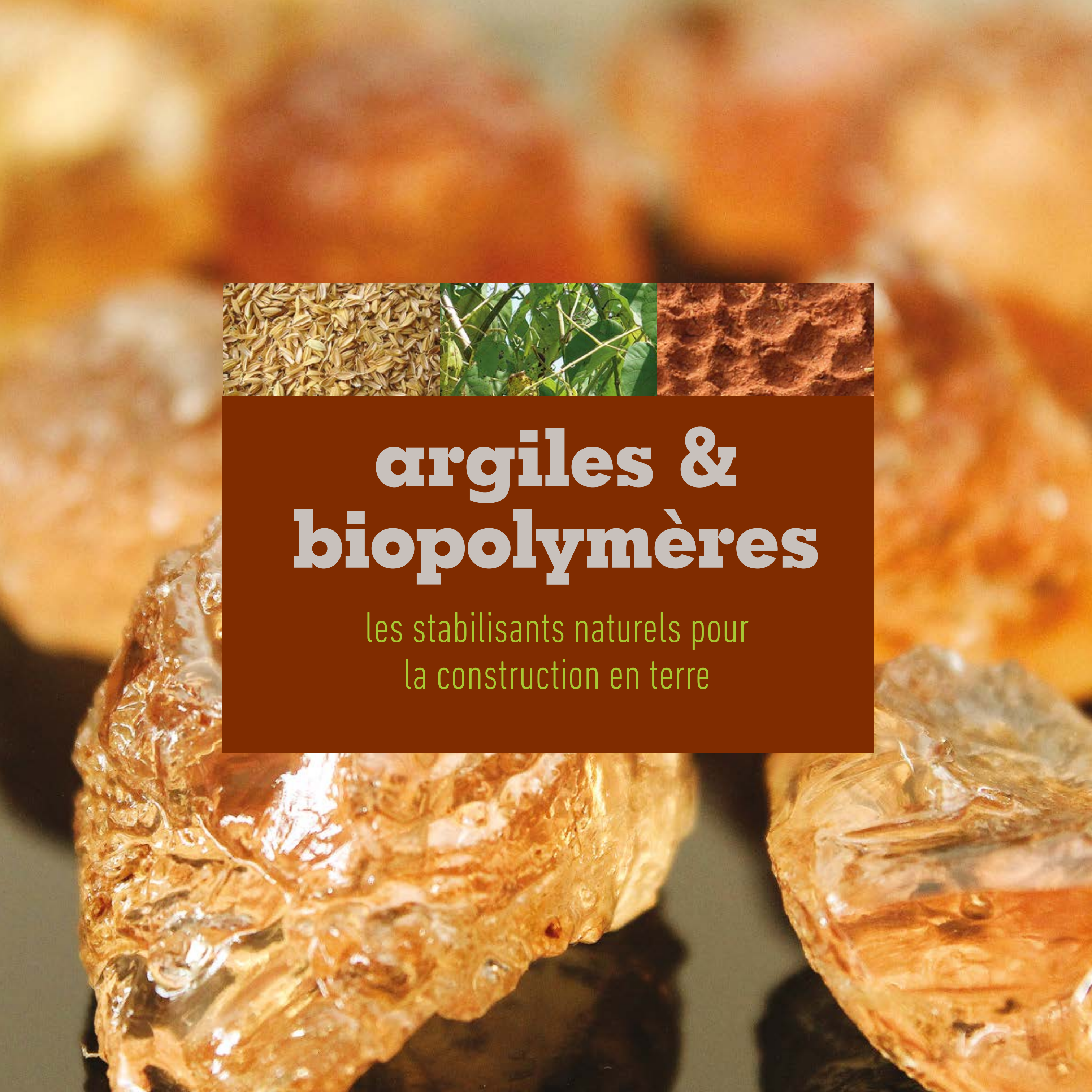

argiles &
biopolymères
les stabilisants naturels pour
la construction en terre

# argiles & biopolymères

les stabilisants naturels
pour la construction en terre

CRAterre éditions

**Cette publication a été élaborée sur la base des résultats du projet PaTerre+ réalisé par CRAterre-ENSAG en collaboration avec le LRMH dans le cadre du Programme National de Recherche sur la Connaissance et la Conservation des Matériaux du Patrimoine Culturel (PNRCC) lancé par le Ministère de la Culture et de la Communication, Secrétariat général, Service de la coordination des politiques culturelles et de l'innovation, Département de la recherche, de l'enseignement supérieur et de la technologie.**

**Elle a été financée conjointement par le Labex AE&CC (ANR-10-LABX-78) et l'IDEFI amàco (ANR_11_IDFI_0008), dans le cadre du Programme des Investissements d'Avenir.**

AUTEURS
**Aurélie Vissac**, amàco, Grands Ateliers
**Ann Bourgès**, LRMH - CRC USR 3224
**David Gandreau**, AE&CC-CRAterre-ENSAG, ComUE UGA
**Romain Anger**, amàco, Grands Ateliers, AE&CC-CRAterre-ENSAG, ComUE UGA
**Laetitia Fontaine**, AE&CC-CRAterre-ENSAG, ComUE UGA

RESPONSABLES SCIENTIFIQUES DU PROJET
Romain Anger, amàco, Grands Ateliers, AE&CC-CRAterre-ENSAG, ComUE UGA
Laetitia Fontaine, AE&CC-CRAterre-ENSAG, ComUE UGA

RESPONSABLE SCIENTIFIQUE DE LA PUBLICATION
Thierry Joffroy, AE&CC-CRAterre-ENSAG, ComUE UGA

COLLABORATEURS
Estel Colas, Fondation de l'Œuvre Notre-Dame de Strasbourg
Lucile Couvreur, amàco, Grands Ateliers
Mariette Moevus, amàco, Grands Ateliers

DESIGN GRAPHIQUE
Arnaud Misse

CRAterre éditions, Villefontaine
Maison Levrat, Parc Fallavier
2 rue de la Buthière - BP 53
38092 Villefontaine Cedex France
Imprimerie Cusin
Janvier 2017
Dépôt légal : Janvier 2017

ISBN : 978-2-906901-88-9

# Partenaires

CRAterre et le LRMH sont les deux partenaires qui ont travaillé conjointement à la réalisation du projet de recherche PaTerre+.




**CRAterre-ENSAG**
Centre International
pour la Construction en Terre
www.craterre.org

CRAterre est un centre de recherche international créé en 1979. Le travail d'inventaire s'est basé sur son fonds documentaire et sur de nombreux échanges avec les experts du réseau de la chaire UNESCO « Architecture de terre, cultures constructives et développement durable » pilotée par le laboratoire CRAterre-ENSAG.




**LRMH** - Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques
www.lrmh.fr

Le Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques est une organisation gouvernementale dépendant du Ministère de la Culture et de la Communication. Il mène des recherches depuis 40 ans sur la conservation des bâtiments protégés au titre des « monuments historiques ».
Les protocoles d'essais ont été mis au point par le LRMH.

---

Le Labex AE&CC et l'IDEFI amàco ont permis la réalisation et la diffusion de ce document de valorisation du projet de recherche PaTerre+.




**Labex AE&CC**
Unité de recherche Architecture,
Environnement et Cultures Constructives
http://aecc.hypotheses.org/

L'unité de recherche AE&CC de l'école Nationale Supérieure d'Architecture de Grenoble, Laboratoire d'Excellence, regroupe, depuis janvier 2011, les laboratoires CRAterre et Cultures Constructives. Elle est désormais intégrée dans la Communauté Université Grenoble Alpes.




**amàco**
atelier matières à construire
www.amaco.org

amàco est un projet de recherche pédagogique, labélisé Initiatives d'Excellence en Formations Innovantes (IDEFI), qui rassemble les Grands Ateliers, l'ENSA de Grenoble, l'INSA de Lyon et l'ESPCI ParisTech.

## AVERTISSEMENT

Améliorer les performances d'enduits existants n'est pas le gage qu'un bien patrimonial sera protégé plus durablement. En effet, dans certaines traditions, la conservation d'un patrimoine est liée à l'organisation d'un entretien régulier ayant aussi pour vocation de rassembler régulièrement une communauté ou des communautés autour d'un bien commun ou encore de s'assurer d'une bonne transmission des savoir-faire. Ceci doit bien être pris en compte afin d'éviter qu'en focalisant les recherches sur la question de performance soit initié un processus de fragilisation du rythme des interventions de maintenance et par là même les modalités de transmission des savoirs (savoir-faire, savoir s'organiser) entre les générations. Sur des biens à fortes valeurs patrimoniales, tels que ceux inscrits sur la Liste du patrimoine mondial, la prise en compte de ces aspects socio-culturels, bien mis en valeur par la déclaration de Nara (1994), est d'une extrême importance.

# Sommaire

07 Avant-propos
08 Introduction
10 Inventaire des recettes traditionnelles
14 Polysaccharides
32 Lipides
38 Protéines
42 Autres molécules complexes
46 Mesures d'évaluation
48 Ouvrabilité
50 Efficacité
56 Compatibilité
60 Durabilité
64 Applicabilité
66 Mesures d'absorption capillaire
68 Test de l'éponge de contact
71 Application de l'enduit stabilisé
72 Conclusion et perspectives
74 Bibliographie



# Avant-propos

## Contexte du projet

Sur tous les continents, des architectures, dont les origines remontent parfois à plus de onze millénaires, témoignent de l'utilisation de la terre comme matériau de construction. Ce matériau est attesté sur plus de 20 % des biens culturels inscrits sur la Liste du patrimoine mondial de l'UNESCO (soit environ 180 biens).

Dans de nombreux pays, le patrimoine construit en terre est encore largement habité. C'est plus particulièrement le cas en France, et ce autant en milieu rural, comme dans la région du Dauphiné, qu'en milieu urbain, comme à Lyon, Rennes, Strasbourg, etc.

L'étude des traditions de par le monde montre qu'une grande variété d'adjuvants organiques, d'origine animale ou végétale, sont ajoutés au matériau terre. Ces pratiques permettent essentiellement d'améliorer la cohésion de la terre et/ou de diminuer sa sensibilité à l'eau, avec des résultats souvent très probants.

Toutefois, ces pratiques restent très peu étudiées de façon scientifique. Ce manque de caractérisation et de règles d'utilisation fait que leurs réutilisations ou adaptations dans d'autres contextes sont quasiment impossibles.

Pourtant, retrouver et si possible optimiser et normaliser ces pratiques de stabilisation naturelle présente un potentiel important pour les bâtisseurs d'aujourd'hui avec de possibles applications à grande échelle. Parallèlement, cela représente de nouvelles opportunités pour les conservateurs qui s'attachent à préserver un patrimoine dont la vulnérabilité face aux changements sociétaux et climatiques est de plus en plus réelle.

## PaTerre +

Le projet PaTerre+, Patrimoine architectural en terre et stabilisants naturels d'origine animale ou végétale, a reçu un financement du Ministère de la Culture et de la Communication dans le cadre des appels à projets 2011 du PNRCC, Programme National de Recherche sur la Connaissance et la Conservation des matériaux du patrimoine culturel.

Ce projet a réuni pendant deux ans, des chercheurs du laboratoire CRAterre-ENSAG et du LRMH. Deux groupes de travail se sont mis en place pour étudier :

- d'une part, la possibilité d'une classification des stabilisants d'origine animale ou végétale en procédant en quatre étapes majeures
  - collecte de documents sources ;
  - établissement d'une liste de recettes traditionnelles ;
  - identification des molécules contenues dans les substances naturelles à l'origine de la stabilisation du matériau terre ;
  - description de la nature des interactions physico-chimiques entre ces molécules naturelles et les argiles.
- d'autre part, pour mettre au point des protocoles permettant de mesurer les performances, la durabilité et la compatibilité d'enduits de protection en terre stabilisée à l'aide de biopolymères, afin d'évaluer
  - les propriétés mécaniques de l'enduit ;
  - la sensibilité à l'eau de l'enduit ;
  - la compatibilité de l'enduit avec le support ancien enduit.

Les résultats des travaux des deux groupes ont été régulièrement partagés. Ils sont rassemblés dans un rapport final élaboré conjointement, en septembre 2013 : *Anger, R., Fontaine, L. (2013). Projet PaTerre+. Interactions argiles/biopolymères : patrimoine architectural en terre et stabilisants naturels d'origine animale et végétale. Rapport final (AE&CC, ENSAG).*

# Introduction

## Problématique

L'affinité des argiles avec la matière organique n'est pas nouvelle. La terre est le substrat privilégié des plantes et, dans les sols, les argiles se lient avec la matière organique sous la forme de complexes argilo-humiques. Cette affinité s'applique également dans le champ de la construction en terre quand le matériau est renforcé par l'ajout de matière organique d'origine végétale (fibres, feuilles, écorces, fruits, graines, huiles, gommes, cires, etc.) ou animale (sang, excréments et urines, caséine du lait, poils et crins, etc.). Les longues chaînes carbonées constitutives du vivant peuvent s'adsorber (se fixer) à la surface des feuillets d'argile et ainsi créer des réseaux reliant les particules d'argile entre elles qui améliorent la cohésion du matériau. Pour que ces phénomènes se produisent, il faut d'une part libérer puis disperser les polymères et, d'autre part disperser les particules d'argiles, pour ensuite organiser le matériau composite organo-minéral.

Dans la plupart des traditions, les adjuvants organiques sont majoritairement utilisés pour les enduits ou protections de surface. Ils visent l'amélioration de certaines des propriétés finales du matériau : résistance mécanique et à l'abrasion (renforcer la cohésion), protection contre l'eau (préserver la cohésion). Mais leur intérêt principal repose sur le fait que, excepté pour des dosages trop importants en corps gras, ces adjuvants naturels n'altèrent pas la perméabilité à la vapeur d'eau. Cette perméabilité est cruciale car des enduits trop étanches peuvent fortement dégrader les structures en terre qu'ils recouvrent : l'eau infiltrée ou provenant des remontées capillaires, ou encore plus simplement la vapeur d'eau qui transite dans le mur de l'intérieur vers l'extérieur de l'habitat, risquent de provoquer des décollements de tels enduits.

Les recettes employées par les bâtisseurs à travers le monde sont variées. Elles découlent de savoir-faire qui se sont transmis de générations en générations. Elles ne sont pas nécessairement optimisées et les mécanismes physico-chimiques à l'œuvre ne sont généralement pas bien connus. Ces pratiques traditionnelles méritent donc d'être mieux étudiées et caractérisées car elles représentent un vivier d'innovations pour la confection d'enduits écologiques autant que pour envisager des actions de conservation adaptées. Ceci implique de bien connaître les matériaux utilisés et leurs performances réelles, en situation. Pour la rénovation, ils doivent répondre à un cahier des charges exigeant pour être efficaces et assurer la pérennité des ouvrages anciens. Ils doivent notamment avoir une bonne compatibilité avec les matériaux du patrimoine. Il y a donc un manque de données dans la littérature scientifique et un besoin clair de mener des recherches sur les mélanges terre-biopolymères pour la restauration de l'architecture en terre. C'est dans cette perspective que le projet PaTerre+ a permis de franchir une première étape.

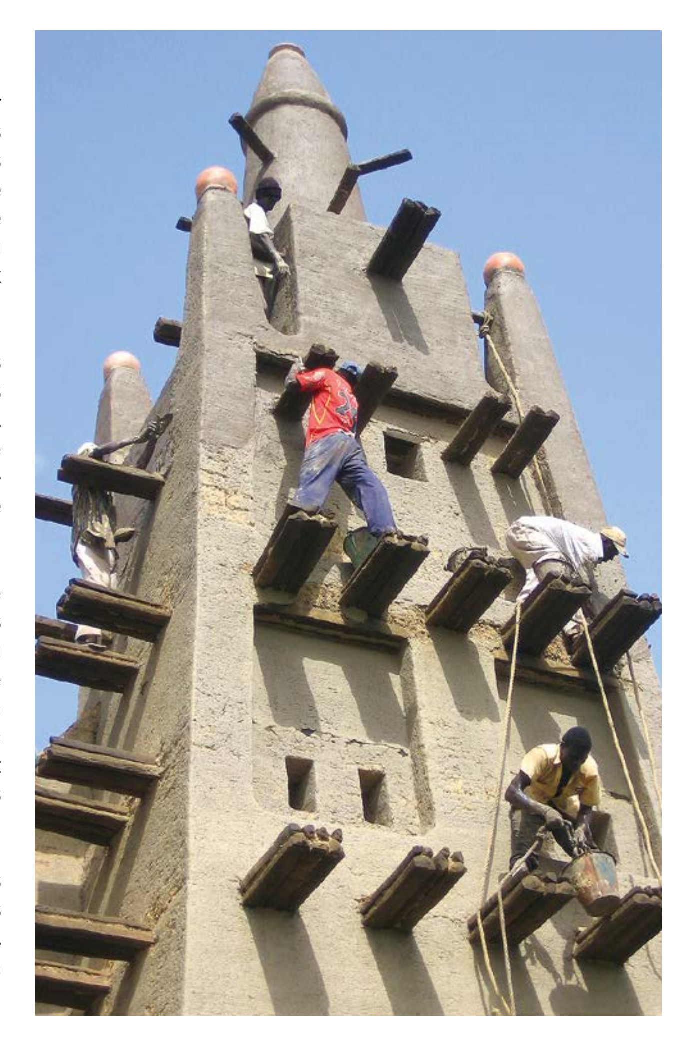
## Résultats

En s'appuyant sur le fonds documentaire de CRAterre et sur des recherches scientifiques menées dans d'autres domaines sur les interactions argiles/biopolymères, ce projet a permis de faire une première synthèse des possibilités en matière de stabilisation naturelle des terres. Parallèlement, il a permis de développer une méthode et des outils permettant de mettre au point des enduits de protection à base de terre résistants aux intempéries tout en restant compatibles avec leurs supports.

Ces outils sont désormais à disposition des professionnels afin qu'ils puissent dans un premier temps sélectionner les solutions techniques qui leur paraissent les plus adaptées. D'autres sont davantage destinés à aider à la réalisation de tests complémentaires permettant de vérifier les performances obtenues et/ou d'affiner la composition avant une utilisation à grande échelle.

La première partie de ce document comprend une synthèse du travail d'inventaire et de l'état de l'art sur les interactions argiles/biopolymères. Les stabilisants d'origine animale ou végétale y sont répertoriés et classés en fonction de la nature de la molécule responsable de l'amélioration de la cohésion et des mécanismes physico-chimiques mis en œuvre. La deuxième partie présente les protocoles d'essais permettant d'évaluer les performances (qualitatives et quantitatives) des matériaux obtenus.

Les applications possibles de ces résultats sont présentées dans la troisième partie, et ce essentiellement au travers d'une étude de cas sur un site archéologique au Tadjikistan. Enfin, les perspectives qu'ouvre ce travail sont présentées en conclusion.




Recette commentée


Pays de provenance d'au moins une recette recensée par le travail d'inventaire

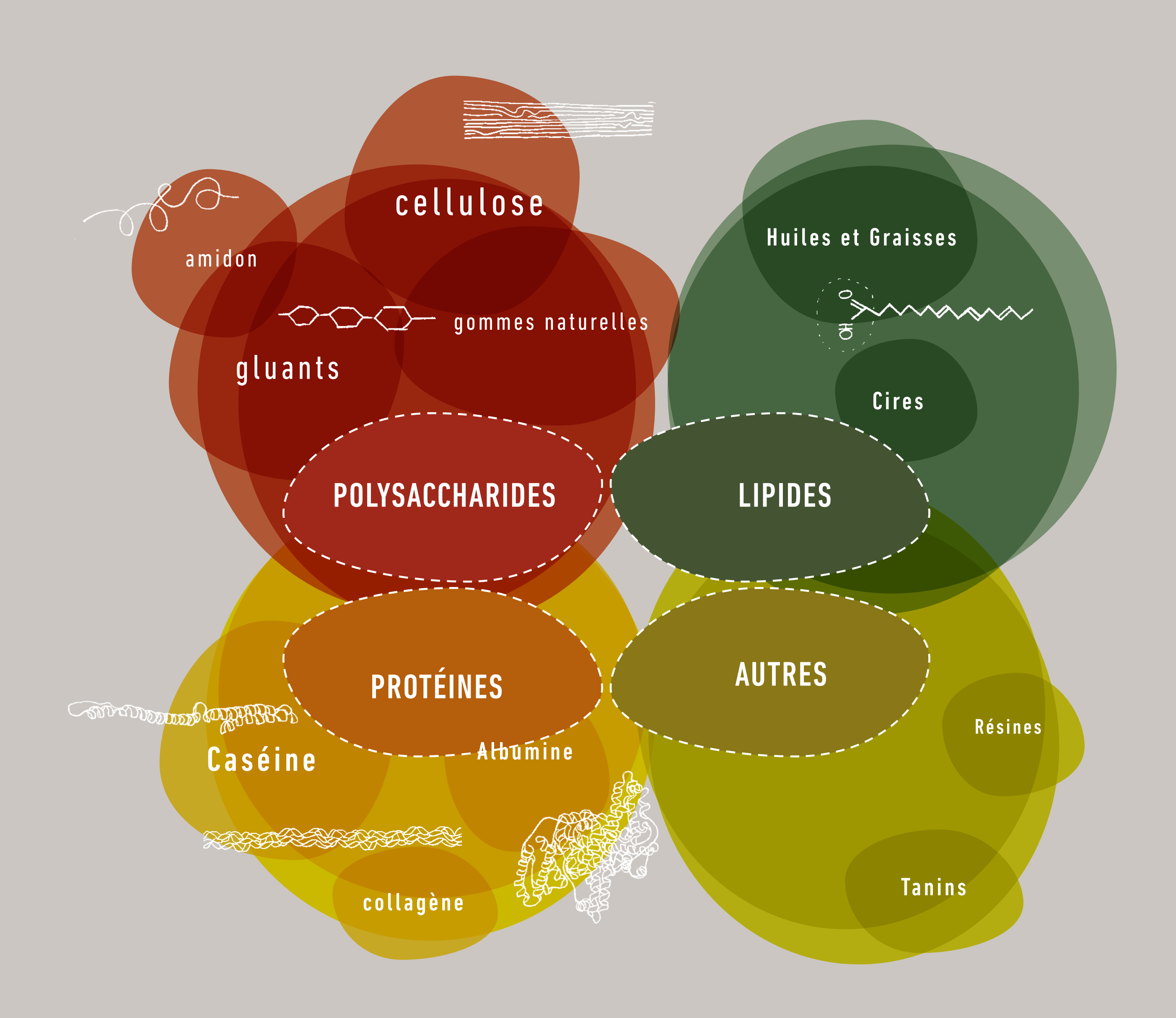
# Inventaire des recettes traditionnelles

Les recettes traditionnelles employées par les bâtisseurs à travers le monde sont très variées. Le travail d'inventaire à l'origine de ce cahier de recettes cible les pratiques qui consistent à consolider la terre crue par l'ajout de matière d'origine végétale ou animale. Cette consolidation s'effectue grâce à l'affinité des molécules du vivant avec les argiles et à leur interaction à l'échelle moléculaire.
Bien souvent, les biopolymères capables de consolider la terre ne sont pas directement disponibles. En effet, la matière organique est extrêmement structurée et hiérarchisée et une étape de préparation préalable est nécessaire pour libérer ces molécules. Les étapes de préparation des adjuvants, lorsqu'elles sont décrites en détail, permettent de mieux comprendre les interactions organo-minérales et de supposer ou vérifier les mécanismes physico-chimiques de la stabilisation organique.

Grâce au fonds documentaire spécialisé sur l'architecture en terre du laboratoire CRAterre-ENSAG et à l'expertise des membres du réseau de la chaire UNESCO « Architectures de terre, cultures constructives et développement durable », le travail d'inventaire a permis de sélectionner 200 références, dont 172 abordent le sujet de la stabilisation organique et 113 sont source de recettes plus ou moins détaillées. En parallèle, une enquête, sous la forme de questionnaires, est venue enrichir la liste des pratiques traditionnelles.

Sur les 30 recettes différentes sélectionnées à travers le monde, une douzaine est présentée dans les pages suivantes. Ce recensement révèle la diversité des méthodes de stabilisation organique de la terre crue ainsi que la complexité de ces techniques. Pour adapter ces recettes utilisant des matériaux locaux, une phase d'expérimentation est nécessaire. Le type de terre, le climat, l'exposition des murs, la mise en œuvre, le contexte socio-culturel, etc. sont autant de facteurs à prendre en compte. L'analyse de ces recettes – fruits de siècles d'expérimentation – et la compréhension des mécanismes d'interaction à l'échelle moléculaire, c'est-à-dire des charges de surface variant en fonction du pH et de la force ionique du milieu, sont deux clés complémentaires pour adapter ces recettes.

Cette phase d'expérimentation permet d'optimiser les performances du stabilisant et d'atteindre un résultat satisfaisant. De plus, de constants allers-retours entre la pratique et la théorie sont très enrichissants et permettent une meilleure compréhension des mécanismes physico-chimiques de la stabilisation de la terre et facilitent ainsi l'utilisation des stabilisants organiques. Ce cahier de recettes invite le lecteur à essayer les préparations décrites et à tester de nouveaux ingrédients disponibles à portée de main. Il s'agit donc d'une source d'inspiration pour mener à bien ses propres expérimentations.


cellulose
amidon
gommes naturelles
gluants
POLYSACCHARIDES
Huiles et Graisses
Cires
LIPIDES
PROTÉINES
Caséine
Albumine
collagène
AUTRES
Résines
Tanins

# Classification des biopolymères

Dans le cahier de recette, les stabilisants d'origine animale ou végétale sont répertoriés en fonction de la nature de la molécule responsable de l'amélioration de la cohésion et des mécanismes physico-chimiques mis en œuvre. Quatre catégories se distinguent : les polysaccharides, les lipides, les protéines et les autres molécules complexes.

La famille des polysaccharides regroupe les macromolécules de la famille des sucres complexes. Ce sont de longues chaînes, linéaires ou ramifiées, formées par la juxtaposition, régulière ou aléatoire, de motifs répétés d'un ou plusieurs sucres simples. La cellulose, l'amidon, les principales molécules des gommes naturelles et les gels de jus végétaux sont des polysaccharides.

Les polysaccharides présentés dans ce cahier de recettes sont tous d'origine végétale. Il existe aussi des polysaccharides d'origine animale, c'est le cas de la chitine : très présente dans la cuticule ou la carapace des insectes et des crustacés.

Les lipides constituent la matière grasse des êtres vivants. Ce sont des molécules hydrophobes, insolubles dans l'eau, en raison de la présence de longues chaînes d'acides gras. Les huiles sont liquides à température ambiante, les cires quant à elles sont solides, enfin les graisses et les beurres ont une consistance intermédiaire.

Les protéines sont des macromolécules du vivant, composées d'une ou plusieurs chaînes d'acides aminés. Les protéines comportent une partie hydrophobe (qui repousse l'eau) ainsi qu'une partie hydrophile (qui « aime » l'eau) : elles sont dites amphiphiles. La caséine du lait, l'albumine du sang ou de l'œuf et le collagène de la peau et des os, sont des protéines d'origine animale.

La dernière catégorie regroupe les autres molécules du vivant qui ne rentrent pas dans les trois grandes familles citées précédemment. Il s'agit principalement des composés phénoliques : les tanins. Ces sont des molécules du règne végétal connues depuis l'Antiquité pour leur capacité à précipiter les protéines (tannage du cuir) ou à chélater des ions métalliques (fabrication de l'encre métallo-gallique).

# Polysaccharides

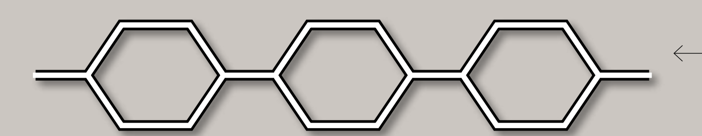
La catégorie des polysaccharides regroupe toutes les recettes à base de fibres végétales, de bouse de vache ou crottin de cheval, de gomme, jus et gel végétaux divers (cactus, agave, racines et feuilles gluantes, algues, etc.), de farine de céréales et de tubercules. Les polysaccharides sont de longues chaînes de sucres qui peuvent avoir un rôle de structure (cellulose et chitine) ou de stockage de l'énergie (amidon).

La plupart des stabilisants utilisés traditionnellement font partie de cette famille. Il en existe une très grande diversité. Ce sont des glucides complexes, de longues chaînes de sucres simples souvent linéaires, parfois ramifiées. Ces polymères sont généralement de très longues molécules. Leur motif de répétition, l'ose, est un cycle de 6 atomes de carbone dont la plupart portent un groupe hydroxyle (OH).

Ces macromolécules sont organisées de manière très structurée et hiérarchisée et il arrive souvent qu'elles ne soient pas directement disponibles pour consolider la terre.

Une étape de préparation est nécessaire pour libérer les molécules responsables de la stabilisation et ainsi permettre leur interaction avec le liant argileux. Par exemple, la macération désolidarise les fibres élémentaires de cellulose de la paroi cellulaire. Le chauffage de l'amylose et l'amylopectine, molécules composant l'amidon, libére ces longues chaînes de leur structure organisée ; elles peuvent alors, grâce à leur souplesse, venir au plus près des argiles de terre pour les fixer. Dans le cas des jus végétaux, une étape succincte de broyage, parfois de cuisson, est nécessaire pour former des gels capables de coller les argiles.

Les polysaccharides consolident la terre en formant des armatures microscopiques entre les particules d'argile. Les longues chaînes de sucres complexes sont capables de relier plusieurs particules minérales entre elles, créant en quelque sorte un réseau. Par ailleurs, au contact de l'eau, les polysaccharides forment généralement des gels, modifiant la consistance du mortier à l'état frais. La pose de l'enduit est parfois facilitée par l'ajout de ces stabilisants.



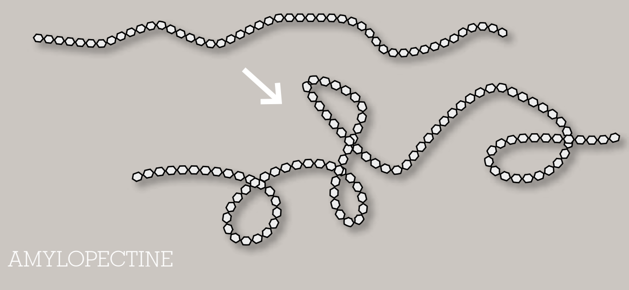
Les polysaccharides sont de longues chaînes de sucres simples. Chacun de ces maillons, représenté par un hexagone, est formé d'une boucle de 6 atomes de carbone portant bien souvent un atome d'oxygène et un d'hydrogène.

La fibre de cellulose est composée de multiples chaînes accolées les unes aux autres de manière assez ordonnée : c'est une longue fibre, droite et rigide. Sa longueur est de l'ordre du $\mu$m. Pour former un gel, elle doit être déstructurée.

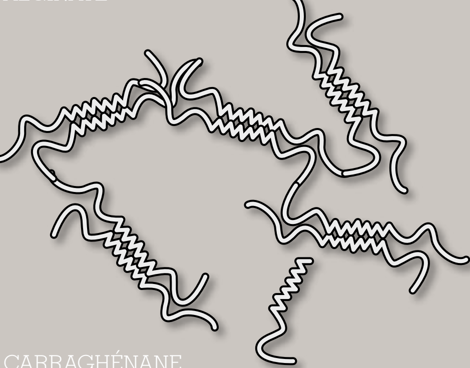
La plupart des polysaccharides forment des gels en présence d'eau (froide ou chaude selon les cas). Les longues chaînes s'entremêlent de manière souple, emprisonnant de l'eau entre elles.
Les alginates et les carraghénanes, polysaccharides des algues, forment des gels en présence de certains sels : les chaînes s'unissent par endroits, formant un réseau tridimensionnel.

L'amidon est composé de deux molécules : l'amylose, linéraire et longue, et l'amylopectine, ramifiée en forme de grappes. Ces deux molécules, lorsqu'elles sont chauffées en présence d'eau (transformation illustrée par la flèche blanche) s'assouplissent et forment des gels.

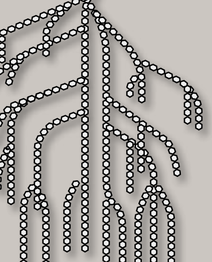
AMYLOSE





AMYLOPECTINE



CARRAGHÉNANE

# Bouse de vache et crottin

## matière première

**La bouse de vache est essentiellement composée de fragments d'herbe non digérés : cellulose et tissus lignifiés (assemblages de fibres assez rigides) et de produits d'origine animale ou microbienne contenus dans les sucs digestifs non digérés. Les micro-organismes sont très présents dans la bouse de vache fraîche.**

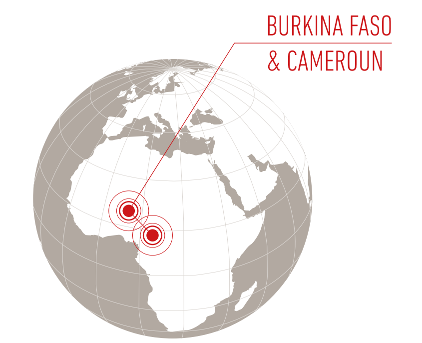
## variantes

Du crottin de cheval, d'âne ou de chèvre est aussi fréquemment utilisé.
La plupart de ces recettes comportent une étape de macération : le mélange humide de terre et d'excréments repose pendant un à plusieurs jours, voire plusieurs semaines.
Parfois, d'autres fibres sont ajoutées. Cela peut se faire avant, pendant ou encore après l'étape de macération.

## principes et interprétation

La décomposition partielle des fibres de cellulose et autres tissus végétaux permet une distribution continue de la taille des fibres dans le mélange : du brin d'herbe à la macromolécule de cellulose micrométrique, toutes les tailles de fibres sont présentes.

Ce sont de véritables armatures à plusieurs échelles : du grain de sable à la plaquette d'argile. La macromolécule de cellulose est assez stable et rigide quel que soit le pH du milieu et les sels présents. Sa surface porte une faible charge négative, parfois nulle. Elle est capable de s'adsorber facilement sur des particules minérales. D'ailleurs, elle est suffisamment longue pour se fixer à plusieurs plaquettes d'argile à la fois et les relier entre elles. Lorsque cette adsorption est homogène et bien proportionnée, elle participe à la cohésion du mortier et augmente la résistance de l'enduit.




Les excréments de ruminants ou d'équidés sont les ingrédients de stabilisation organique les plus répandus et pratiqués à travers le monde : Afrique (Burkina Faso, Mali, Cameroun, Ghana, etc.), Amérique Latine (Pérou, Chili, Argentine, etc.), aux États Unis, en Europe (France, Allemagne, etc.), en Asie (Inde, Népal, etc.).

La bouse de vache contient de nombreuses fibres de cellulose en partie décomposées : elles sont très fines et peuvent ainsi interagir davantage avec les argiles de la terre.



## recette n°1

 Case obus des Mousgoums

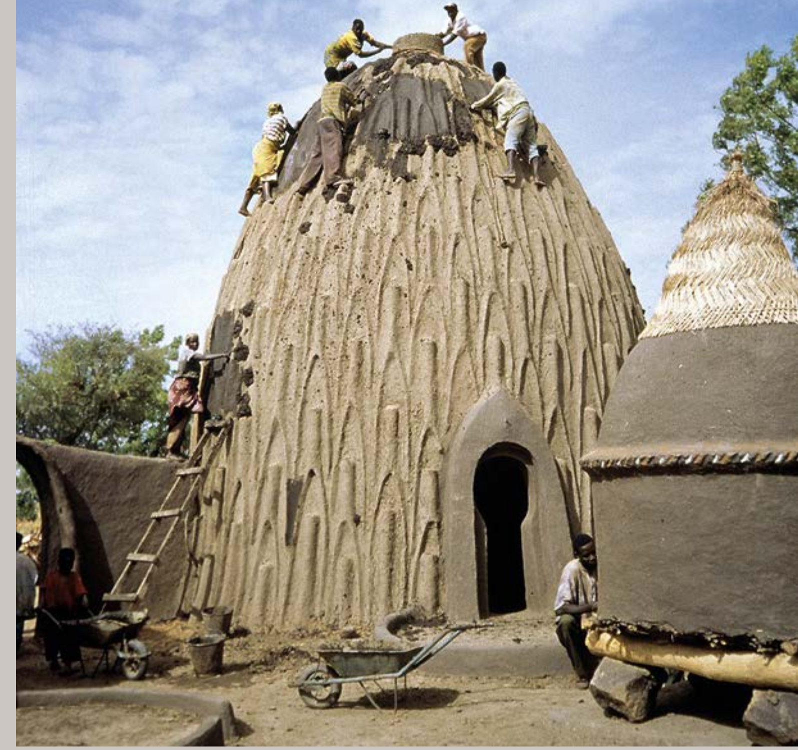
 Cameroun

 Lazare Eloundou

« Les matériaux étaient collectés dans la nature environnante : une terre argileuse, une herbe spéciale appelée en langue Mousgoum, *sousouki*, et du crottin de chèvre. La préparation de la « pâte » qui servait à bâtir les murs se faisait avec beaucoup d'attention. La terre piochée, répartie en cinq ou six petits tas, était mouillée et malaxée jusqu'à obtenir une consistance pâteuse. Une fois cette opération terminée, les mêmes tas devaient ensuite être mélangés avec le crottin de chèvre et de l'herbe préalablement coupée, presque hachée menu. Les tas étaient de nouveau arrosés et encore mélangés jusqu'à obtenir un produit homogène. Il était conseillé de laisser « pourrir » ce dernier mélange pendant sept à huit jours en l'humidifiant de temps en temps. La macération suffisante se confirmait par la couleur sombre du mélange et l'odeur forte qui s'en dégageait. Un moyen de contrôler si la préparation était bien faite était de vérifier la quasi invisibilité de la paille dans le matériau prêt à bâtir. »

Eloundou L. (2005). La conservation traditionnelle de la case obus des Mousgoums. In : Les pratiques de conservation traditionnelles en Afrique, ICC ROM, p. 81-87





# Fibres fermentées

La balle est l'enveloppe qui entoure le grain de riz.

MALI

La pratique de la macération du stabilisant organique est très répandue : chaque continent dispose de ses variantes. La balle de riz fermentée est fréquemment utilisée au Mali.

## matière première

**Il existe une grande variété de sous produits agricoles s'utilisant comme matière fermentescible pour stabiliser les mortiers de terre. Parmi eux, les pailles fines ou broyées et balles de céréales, le foin (notamment le foin de fonio au Burkina) sont les plus utilisés.**
**Pour accélérer le processus de dégradation de ces matières, du jus d'ensilage ou des peaux de fruits comme le raisin ou la pomme s'emploient parfois pour déclencher la fermentation.**



## variantes

La macération de fibres végétales est très largement répandue : chaque région du monde propose des recettes similaires avec ses propres ingrédients. Les nombreuses variantes diffèrent par leurs ingrédients aussi bien que par leur temps de macération allant de quelques jours à plusieurs semaines. Cette étape de macération dépend des conditions de température et d'humidité.

## principes et interprétation

La macération de fibres végétales conduit, lorsque les conditions de température et d'humidité sont favorables, à leur décomposition par des micro-organismes (bactéries et champignons). Ils dégradent peu à peu la matière organique en commençant par absorber des sucres simples. Ils s'attaquent ensuite, par leurs enzymes extracellulaires, à des biopolymères plus ou moins aisément dégradables (pectines, amidon, cellulose, etc.). En revanche, certaines macromolécules comme la lignine sont difficilement dégradées.

Au fur et à mesure de cette dégradation, les molécules de cellulose et autres fibres microscopiques se séparent, la matière végétale se divise : la surface de contact entre les argiles et ces fibres végétales microscopiques est très grande, leurs chances d'interagir se multiplient.

De plus, certaines bactéries fabriquent des biopolymères appelés exopolysaccharides. Ce sont souvent des polysaccharides complexes : des grandes molécules stables, capables de former des gels et de lier les particules minérales entre elles.
Ce sont de véritables colles des argiles qui peuvent rendre le mortier plus visqueux et faciliter sa mise en œuvre.

## recette n°2

 Bale de riz fermentée pour enduits

 Mali

 Gisèle Taxil

Togola T., Sanogo K., Taxil G., Carazas Aedo W., Siravo F., (2007). Compte rendu final des travaux de restauration de la Grande Mosquée de Mopti (Genève : AKTC).

« La préparation de l'enduit a réclamé trois à quatre semaines de temps de macération. Dans les bassins, les mottes de *banco noir* [terre locale] ont été brisées avec la pioche, puis recouvertes totalement d'eau. [Pendant trois ou quatre jours, la terre est écrasée à la pioche puis malaxée (pieds et mains) jusqu'à] obtenir un mélange de la consistance d'une boue liquide à laquelle ont été ajoutés trois sacs de balle de riz tamisée dans chaque bassin.

Le mélange est pétri à la main au moins une fois par semaine ; la couleur [devient] gris foncé [...] la fermentation fait augmenter le volume tout en donnant une odeur de pourriture. De l'eau a été ajoutée régulièrement car l'évaporation était forte et le processus de macération ne devait pas être interrompu.

Le jour du crépissage environ 5 sacs de balle de riz ont été ajoutés dans chaque bassin jusqu'à obtenir une consistance d'une boue très chargée en fibres. »

*La restauration de la Grande Mosquée de Mopti était un projet joint du Trust Aga Khan pour la Culture, Programme des villes historiques et le Ministère de la Culture du Mali, Direction Nationale du Patrimoine. Le projet s'est déroulé entre octobre 2004 et Juin 2006.*

# Papier washi

Le washi est le papier traditionnellement fabriqué au Japon.

JAPON

Le papier washi s'emploie dans les enduits en terre au Japon. Une technique céramique récente, proche de la recette traditionnelle japonaise, la terre papier ou paperclay est une pratique de plus en plus répandue.

## matière première

**Le papier washi est fabriqué à partir du bois de petits arbres sauvages du Japon, de Chine, de Corée et du Népal : le *mitsumata*, le *kouzo* et le *ganpi*. Les débuts de la fabrication de ce papier remontent à près de 1 500 ans. Les Japonais utilisent traditionnellement les déchets de papier dans les enduits en terre.**

## variantes

Dans la technique récente de la terre-papier, des papiers et cartons d'origines variées s'emploient (papier journal, carton d'emballage, boîte à œufs, etc.). Avec des papiers fins, comme le papier toilette, l'obtention de la consistance de pulpe est plus rapide.
Suivant la source de papier utilisé, la taille des fibres peut varier.

## principes et interprétation

Les étapes de trituration du papier sont déterminantes pour l'obtention de fines fibres de longueur millimétrique. Plus elles sont prolongées, plus le papier se divise en fines fibres.

À l'identique de la paille à l'échelle du grain de sable, les fines fibres de papier sont de véritables armatures pour les argiles. Elles jouent un rôle structurel important en renforçant l'enduit. Lors de chocs, l'énergie emmagasinée se dissipe davantage le long des nombreuses interfaces entre les fibres et le liant, augmentant la résistance à la rupture du matériau.

De plus, l'étape de trituration donne une consistance un peu gluante au papier gorgé d'eau : entourant les fibres millimétriques, une sorte de gel assure l'adhésion des fibres aux particules minérales.

Les fibres du papier washi sont utilisées dans la couche de finition de cet enduit






Papier washi pour enduits

Japon

Kenji Matsuki

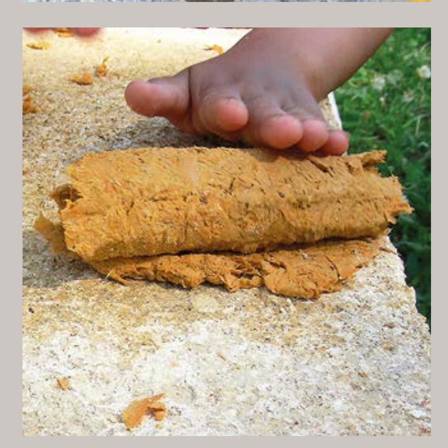
«- Découper en petits morceaux le papier et tremper dans l'eau jusqu'à ce que les fibres commencent à se séparer.

- Filtrer, puis travailler cette pulpe en la roulant et frappant à l'aide de baguettes en bois
- Laisser tremper une deuxième fois. Les fibres obtenues sont très fines et longues de 5 à 30 mm.
- Filtrer et mélanger la pulpe au mortier de terre.»

Entretien et démonstration de Kenji Matsuki pendant le festival Grains d'Isère 2012













# Eau gluante

Ces feuilles sèches, *fouga*, font partie des végétaux qui forment des gels au contact de l'eau.

GHANA & BURKINA FASO

Différentes recettes à base d'eau gluante ont été recensées en Afrique de l'Ouest, notamment au Ghana et au Burkina Faso.

## matière première

**Différents végétaux sont susceptibles de former un gel au contact de l'eau. La recette du *vuolu* pratiquée au Ghana utilise les branches d'une sorte de vigne sauvage. D'autres tiges et branches, mais aussi des feuilles et des racines, ont également cette capacité de rendre gluante l'eau dans laquelle elles trempent.**

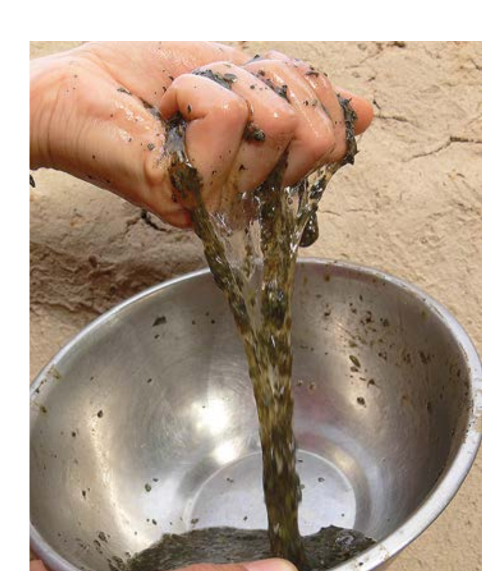
## variantes

La préparation de l'eau gluante demande plus ou moins d'étapes suivant la matière première utilisée. Par exemple, il suffit juste de tremper dans l'eau les feuilles sèches *fouga*, utilisées au Burkina Faso, pour qu'un gel se forme instantanément.
Cette eau gluante sert, dans la plupart des cas, d'eau de gâchage. Elle est parfois additionnée de bouse de vache.

## principes et interprétation

Les molécules de ces différentes matières premières capables de former instantanément un gel au contact de l'eau ne sont pas identifiées. Il s'agit très probablement de diverses macromolécules de la famille des polysaccharides.
Au contact de l'eau, ces macromolécules s'hydratent et se déploient tout en interagissant avec leurs voisines. Généralement, les gels de polysaccharides sont constitués d'un réseau tridimensionnel de macromolécules liées à quelques endroits par des liaisons faibles qui se forment à courte distance (ponts hydrogène, ponts ioniques et liaisons de Van der Waals).

Ces gels jouent un rôle sur la consistance du mortier frais et sur le séchage des enduits. Ce dernier pourrait être un peu ralenti et plus homogène, réduisant la formation de fissures.
De plus, au fur et à mesure de l'évaporation de l'eau lors du séchage, ces gels deviennent une véritable colle pour les particules minérales. En effet, lorsque l'eau s'évapore, les distances entre les particules minérales et les biopolymères se raccourcissent : leurs liaisons se renforcent. Parallèlement, les molécules ont alors moins de degré de liberté, elles se rigidifient, accentuant cet effet de colle.



L'eau devient instantanément gluante au contact des feuilles *fouga* : il se forme un gel, véritable colle des argiles.

## recette n°4

Eau gluante (Vuolu)

Ghana

Sébastien Moriset

Moriset, S. (2009) Reconstruction of the Wa Naa Yiri, Ghana : Second mid-project report. Ed. CRAterre-ENSAG

« Écraser les branches d'*hilampo* à l'aide d'un marteau. Tremper dans l'eau les branches écrasées et presser à la main afin d'obtenir un liquide gluant (*vuolu*). Diluer la bouse de vache dans l'eau et mélanger à l'eau gluante. Utiliser ce mélange comme eau de gâchage. Pour réaliser 2000 litres du mélange *vuolu* + bouse de vache, 300 litres de bouse de vache et approximativement 50 mètres linéaires de branches *Hilampo* on été utilisés »









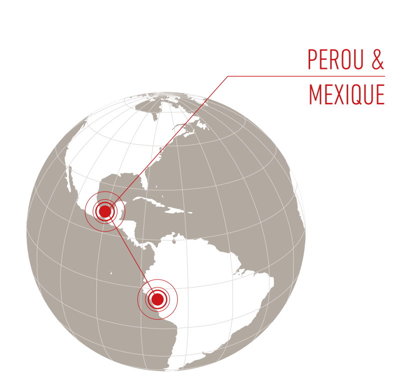






# Cactus, agave, aloès

La chair des cladodes, tiges en forme de raquettes des cactus du genre Opuntia, est employée dans certaines recettes.




Les recettes à base de cactus, d'agave ou d'aloès s'emploient fréquemment en Amérique Latine

## matière première

**La chair des tiges de deux grandes familles de cactus sont utilisées : les cactus du genre Cereus (tiges en forme de colonne) et ceux du genre Opuntia, dont les cladodes (partie de la tige en forme de feuille) sont aplaties et rondes.**
**Pour les agaves et les aloès, c'est la pulpe des feuilles qui s'emploie comme stabilisant.**

## variantes

Il existe plusieurs méthodes pour préparer le jus des tiges de cactus ou des feuilles d'agaves et d'aloès. Suivant les recettes, les temps de trempage varient, aboutissant à des états plus ou moins avancés de décomposition.
La solution visqueuse peut être légèrement diluée avant la mise en œuvre du badigeon. Elle est aussi souvent mélangée à l'eau de gâchage de l'enduit.

## principes et interprétation

Le jus de cactus, tout comme la pulpe d'agave ou d'aloès, est composé essentiellement d'eau et d'un polysaccharide dont la structure est proche de la pectine : une longue molécule ramifiée, capable de former un gel.
Les gels de pectine se forment lorsque ces macromolécules peuvent s'approcher suffisamment les unes des autres et former des liaisons faibles (ponts hydrogènes et interactions hydrophobes). La formation de gel de pectine est facilitée par une baisse de pH (milieu acide), par l'effet déshydratant du sucre (saccharose) et/ou par la présence de cations comme le sodium ou le calcium qui neutralisent les charges négatives répulsives. L'étape de trempage, parfois de macération, est nécessaire pour réunir les conditions favorables de gélification.

La pulpe de l'aloe vera donne un gel translucide.





# recette n°5










« Le jus de cactus est obtenu en trempant des tiges de cactus hachées dans de l'eau (à poids égal) pendant 5 jours à température ambiante. À la fin de cette période, la matière organique s'est dégradée en partie et un fluide visqueux s'est formé. La matière solide résiduelle est éliminée du fluide avant de l'utiliser comme stabilisant de la terre crue. »

Heredia Zavoni, E.A., Bariola Bernales, J.J., Vargas Neumann, J., and Mehta, P.K., (1988). Improving the moisture resistance of adobe structures. Materials and Structures 21, 213–221.

# Algues

La décoction de cette algue séchée forme un gel en refroidissant.

JAPON

La recette traditionnelle de la colle d'algue est originaire du Japon. Elle a inspiré quelques expérimentations récentes en Europe, où son usage a également été recensé.

## matière première

**Les algues utilisées au Japon font partie de la famille des algues rouges. *Tsunomata*, *ginnansou* et *funori* sont les noms vernaculaires des algues du bord de mer, au nord du Japon. Deux additifs alimentaires très utilisés dans l'industrie agroalimentaire sont issus des algues rouges : les carraghénanes et l'agar-agar. Ce sont deux gélifiants.**

## variantes

Les proportions et la dilution de la colle d'algue sont ajustées pour chaque terre et chaque mortier.

Les recettes font référence aux algues rouges mais il est envisageable de mettre au point d'autres préparations à partir d'algues vertes ou d'algues brunes. Ces dernières donnent un autre type de polysaccharide : l'alginate. C'est aussi un additif alimentaire très employé ; il forme un gel en présence d'eau et au contact d'ions calcium.

## principes et interprétation

Les deux principaux extraits d'algues rouges sont l'agar-agar et les carraghénanes. Ces deux polysaccharides forment des gels en refroidissant après avoir atteint des températures entre 60 et 100° C.
Ces gels deviennent de plus en plus fluides lorsqu'ils sont remués. Laissée au repos, la matière se réorganise et redevient solide. Cette propriété facilite la mise en œuvre des enduits.
À la manière des autres gels de polysaccharides, le gel d'algue, en séchant, devient une colle pour les particules minérales.

Cette algue, ginnan, du Japon gonfle dans l'eau froide avant d'être bouillie.





## recette n°6

Colle d'algue
Japon
Masako Isomura

« Tremper dans l'eau au moins une demi-journée (une demi-journée l'été et un jour en hiver). Faire cuire à feu vif jusqu'à ébullition, puis à feu doux. Faire cuire plus de 1 heure jusqu'à obtenir un état fluide. Tamiser à 1 mm. Laisser refroidir. »

Ismura, M. Recette traditionnelle du japon. In : Fontaine, L., Anger, R., (2007). Série de questionnaires sur la stabilisation traditionnelle. NP.





















# Farines de blé

La farine de blé contient de l'amidon.

## matière première

**La farine de blé est essentiellement composée d'amidon. Ce polysaccharide est la principale réserve nutritive du monde végétal ; il est emmagasiné dans les graines, les tubercules et les racines. Les grains de céréales en contiennent 40 à 90 % de leur poids sec et les tubercules comme la pomme de terre entre 65 et 85 %.**

## variantes

De nombreux végétaux sont source d'amidon : la farine de blé, la maïzena ou farine de maïs, la farine de riz, le tapioca ou fécule de manioc, la fécule de pomme de terre, etc.

La colle de farine s'utilise diluée à l'eau dans la masse de l'enduit comme eau de gâchage ou comme badigeon sur la couche de finition, une fois sèche.

## principes et interprétation

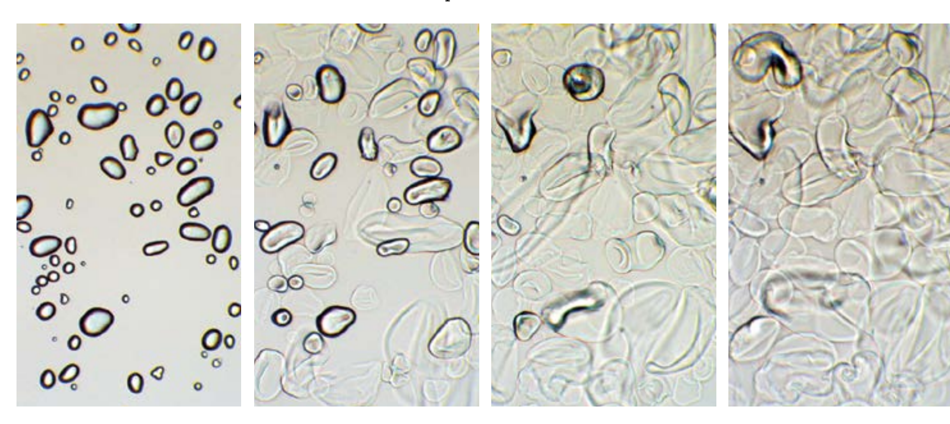
Les grains d'amidon ont la particularité d'éclater lorsqu'ils sont en présence d'eau et chauffés à 70°C. Il se forme alors un empois, dispersion colloïdale plus ou moins visqueuse qui gélifie en refroidissant (phénomène qui provoque l'épaississement de la sauce béchamel). C'est sous cette forme d'empois que l'amidon est utilisé pour stabiliser la terre.

La présence de sels (sel de table, eau calcaire, etc.) ont une action défavorable : ils ont tendance à inhiber la formation du gel d'amidon.

Le gel d'amidon est rhéofluidifiant : plus il est agité, plus il devient fluide. L'ajout de colle de farine dans un mortier de terre modifie sa consistance : il devient plus souple lors de l'application.

En séchant, les gels de polysaccharides collent davantage les argiles de la terre, renforçant les propriétés de l'enduit.

Visibles au microscope optique, les grains d'amidon gonflent puis éclatent en présence de soude. Dans l'eau chaude, on observerait le même phénomène.



CANADA

Plusieurs ouvrages récents mentionnent la recette de la colle de farine utilisée comme couche d'accroche de l'enduit, ou bien mélangée directement dans le corps d'enduit. Il s'agit d'une technique, a priori, assez répandue dont l'usage est relativement récent.



## recette n°7



Colle de farine

Canada

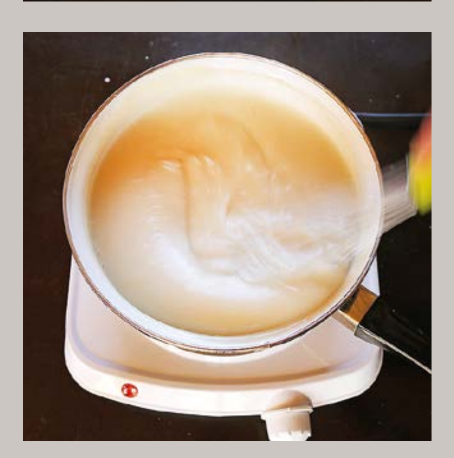
Cedar R. Guelberth,
and Daniel D. Chiras













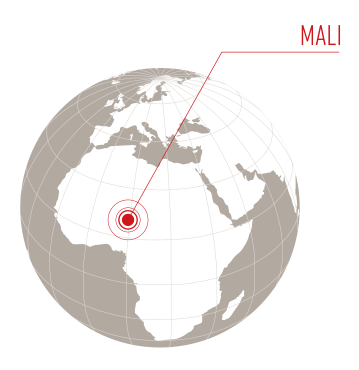
« - Faire bouillir 3 L d'eau dans une grande casserole, au dessus d'un feu puissant.
- Remplir la moitié d'un seau de 10 L avec de l'eau froide, ajouter doucement de la farine jusqu'à obtenir une pâte blanche, fluide et un peu épaisse (type pâte à crêpe).
- Mélanger jusqu'à ce que les grumeaux disparaissent.
- Verser peu à peu (pour ne pas perdre l'ébullition) la pâte dans l'eau qui boue sans cesser de remuer : la pâte devient translucide au fur est à mesure qu'elle est mélangée à l'eau bouillante.
- Continuer de chauffer jusqu'à ce que la pâte ait la consistance d'une sauce épaisse.
- La retirer du feu, enlever les grumeaux.

La colle de farine se conserve quelques jours au frais »

Guelberth, C.R., and Chiras, D. (2002). The Natural Plaster Book: Earth, Lime, and Gypsum Plasters for Natural Homes (New Society Publishers).

# Gomme

La gomme arabique est secrétée par les arbres de la famille des acacias.




La gomme arabique est exportée dès l'antiquité depuis le Soudan. Elle est globalement produite en Afrique Subsaharienne. La gomme de guar est produite en Afrique de l'Ouest et la gomme de caroube dans le bassin méditerranéen.

## matière première

**Les gommes naturelles sont extraites des végétaux, à l'exception de la gomme xanthane, produite par des bactéries. Certaines gommes, comme la gomme arabique, sont des exsudats de plantes sécrétés pour cicatriser leurs plaies et se protéger de l'intrusion d'insectes ou de micro-organismes. D'autres gommes proviennent de graines de légumineuses (gomme de caroube et gomme de guar).**

## variantes

Les gommes naturelles, solubles dans l'eau froide, sont utilisées comme épaississants alimentaires et entrent souvent dans la composition des peintures.
La gomme arabique, produite par des arbres de la famille des Fabacées, celle des acacias, est la plus utilisée.

## principes et interpretation

La catégorie des gommes regroupe plusieurs polysaccharides : la gomme arabique est composée majoritairement d'un aribinogalactane, la gomme de guar et la gomme de caroube sont des galactomannanes, la gomme xanthane est un hétéropolysaccharide complexe.
Les gommes sont composées de longues macromolécules neutres (gomme de guar) voire anioniques (xanthane), généralement solubles dans l'eau chaude comme dans l'eau froide, qui augmentent fortement la viscosité de l'eau dans laquelle elles sont diluées.

Ces polysaccharides ont la capacité de s'adsorber sur des surfaces minérales, notamment les plaquettes d'argiles. Les gommes neutres interagissent par liaisons hydrogène avec les surfaces minérales, davantage en présence d'ions brisants comme le potassium, qu'en présence d'ions structurants comme le sodium. Les gommes portant des charges négatives s'adsorbent par pontages ioniques notamment sur les surfaces négatives des plaquettes d'argile. Cette liaison est renforcée par la présence de cations multivalents. Ces molécules étant très longues, parfois ramifiées, elles peuvent relier plusieurs particules minérales.

Les gommes, notamment celle dont la charge de surface est faible voire nulle, jouent également le rôle de colle pour les terres sableuses.



## recette n°8


Gomme arabique


Mali

Thierry Joffroy

Diluer la gomme arabique dans 4 fois son volume d'eau froide.
« La terre [...] a été mélangée à environ 20 % de sable et 3 % de gomme arabique. »

Le mélange d'eau et de gomme arabique s'emploie soit en eau de gâchage soit comme badigeon pour protéger et fixer les grains de l'enduit sec.

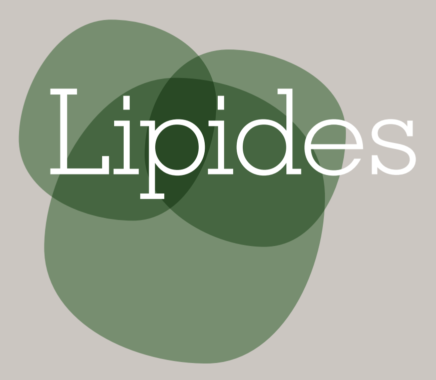
Joffroy, T., Moriset, S. (1996) Chantiers pilotes de formation à la conservation des mosquées de Tombouctou. Rapport de mission. Tombouctou, Mali. Ed. ICCROM, CRAterre-ENSAG, UNESCO.











# Lipides

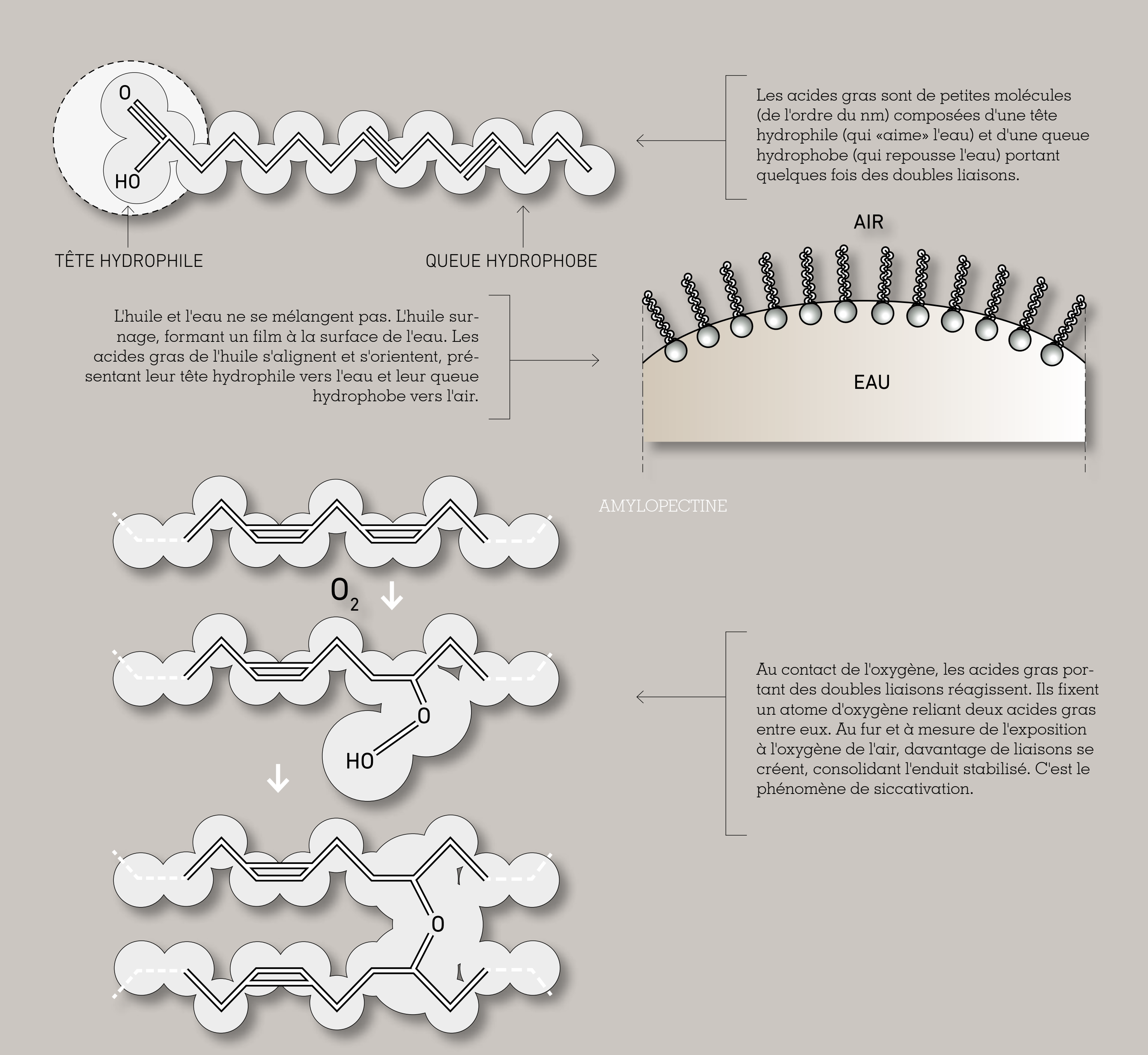
Les lipides constituent la matière grasse des être vivants. Alors que la plupart des familles de molécules de base du monde vivant sont définies par leur structure chimique, les lipides sont caractérisés par leur propriété physique : la solubilité. Ils ne sont pas ou faiblement solubles dans l'eau. Les termes huile, beurre, graisse, cire ne désignent que leur état physique, liquide, solide ou de consistance intermédiaire à température ambiante.

Un lipide est une molécule soit complètement apolaire (lipide neutre) soit amphiphile avec une tête polaire liée à une chaîne fortement apolaire (queue). Les acides gras font partie de la famille des lipides. Les acides gras naturels les plus répandus ont des points communs : ils sont monocarboxyliques, ils ont une seule tête polaire et ont une chaîne aliphatique non ramifiée avec un nombre pair d'atomes de carbone, une longue queue apolaire. Les acides gras comprenant 16 ou 18 atomes de carbone sont les plus abondants. Les liaisons covalentes simples entre les atomes de carbone donnent à la macromolécule une grande flexibilité. La température joue un rôle important pour les lipides, elle augmente cette flexibilité.

Certains acides gras sont saturés et d'autres en partie insaturés en hydrogène. Ces derniers comportent des doubles liaisons, au nombre maximum de 6, correspondant à l'absence d'hydrogène. Ces doubles liaisons, lors du séchage de l'huile, s'ouvrent et permettent de créer de nouvelles liaisons entre acides gras. Les molécules se lient les unes aux autres, elles réticulent, conduisant au durcissement de l'huile, c'est-à-dire à la siccativation.

Les acides gras étant de petites molécules hydrophobes, seulement de faibles interactions avec les argiles peuvent être envisagées. Néanmoins, pendant l'étape de siccativation des corps gras insaturés, il est possible que de nouvelles liaisons se créent, consolidant l'enduit.

Les corps gras modifient l'ouvrabilité du mortier frais, agissant comme un lubrifiant entre les particules minérales et facilitant la pose de l'enduit. Les lipides, grâce à leur propriété hydrophobante, améliorent la résistance à l'eau des enduits. Cependant, de trop grandes proportions de corps gras peuvent altérer la perméabilité à la vapeur d'eau.


O
HO
TÊTE HYDROPHILE
QUEUE HYDROPHOBE
Les acides gras sont de petites molécules (de l'ordre du nm) composées d'une tête hydrophile (qui «aime» l'eau) et d'une queue hydrophobe (qui repousse l'eau) portant quelques fois des doubles liaisons.
AIR
EAU
L'huile et l'eau ne se mélangent pas. L'huile surnage, formant un film à la surface de l'eau. Les acides gras de l'huile s'alignent et s'orientent, présentant leur tête hydrophile vers l'eau et leur queue hydrophobe vers l'air.
AMYLOPECTINE
$O_2$
O
HO
O
Au contact de l'oxygène, les acides gras portant des doubles liaisons réagissent. Ils fixent un atome d'oxygène reliant deux acides gras entre eux. Au fur et à mesure de l'exposition à l'oxygène de l'air, davantage de liaisons se créent, consolidant l'enduit stabilisé. C'est le phénomène de siccativation.

# Huile de lin



L'huile de lin est extraite des graines par pression à froid.

FRANCE

L'utilisation de l'huile de lin est très courante en Europe.

## matière première

**L'huile de lin est extraite des graines : elles sont séchées puis légèrement grillées avant d'être pressées. L'emploi de cette huile en peinture remonte au XVe siècle.**
**D'autres huiles, d'usage traditionnel ou récent, sont également employées pour stabilisant la terre : l'huile de kapok, de raisin sauvage, l'huile de poisson, l'huile dure (mélange d'huile de lin, de bois de chine et de ricin), etc.**

## variantes

Les huiles sont des corps gras liquides à température ambiante. Suivant l'usage et la viscosité de l'huile, il est parfois nécessaire de la chauffer un peu ou de la diluer dans un solvant comme la térébenthine pour faciliter son application.
Les huiles s'utilisent dans la masse, ajoutées après l'eau de gâchage ou en imprégnation sur l'enduit de finition sec. Elles sont généralement réservée aux couches de finition et aux endroits les plus exposés aux détériorations (sols, mur extérieur particulier, etc.)

## principes et interprétation

Les huiles sont des composés hydrophobes qui ne sont pas miscibles à l'eau. Elles contribuent à améliorer la résistance à l'eau des enduits et sols en terre.
De plus, certaines huiles, dites siccatives, peuvent rendre plus résistant l'enduit ou le sol de terre, en durcissant. Le phénomène de siccativation concernent les acides gras comportant des doubles liaisons : ceux enrichis en omégas 3, 6 et 9. Il s'agit d'un phénomène très lent de polymérisation des acides gras. Ces acides gras polyinsaturés s'oxydent à l'air et forment des liaisons covalentes entre eux : les molécules d'acides gras se relient fortement les unes aux autres, l'huile durcit.
La présence d'oxydes métalliques accélère la siccativation : ce sont des siccatifs, ils apportent l'oxygène nécessaire au durcissement de l'huile grâce à leurs groupements hydroxyles.



Les champs de lin en fleurs sont reconnaissables à leur couleur bleutée.

## recette n°9


Huile de lin


France


Lydie Didier

« - D'abord gâcher l'enduit à l'eau.
- Puis, ajouter une cuillère à soupe de lin pour 5 L d'enduit. »

FAL.ev, (2005). M1-D5-i2 in : CD « les enduits en terre ». Projet Européen Leonardo da Vinci

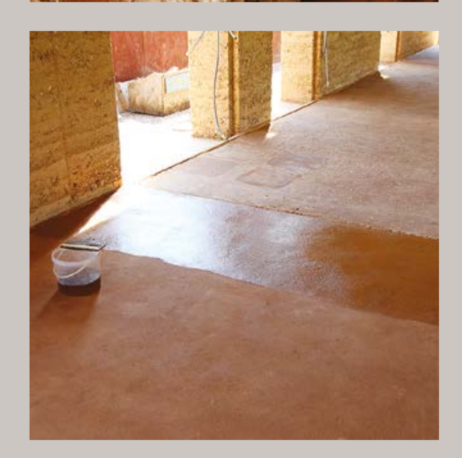
L'huile de lin, bien souvent additionnée d'essence de térébenthine pour la fluidifier, s'applique également en badigeon sur l'enduit sec.













# Beurre de karité

Le beurre de karité est extrait des noix de karité bouillies.

MALI

Le beurre de karité est produit en Afrique de L'Ouest.

## matière première

**Le beurre de karité est une graisse végétale issue des fruits du karité (Vitellaria Paradoxa), arbre des savanes soudaniennes à guinéennes. Certaines recettes mentionnent l'utilisation des résidus ou de l'eau issus de son procédé de fabrication. L'eau de karité est quelques fois utilisée comme eau de gâchage.**

## variantes

Les graisses végétales ou animales s'utilisent, en général, uniquement dans la couche de finition. Afin de réaliser un mélange homogène avec le mortier, les graisses sont préalablement fondues : exposées à la chaleur elles deviennent liquides. Toutes les graisses ne fondent pas à la même température. Afin de faciliter la mise en œuvre, il est conseillé de les utiliser au-delà de leur température de solidification.

La graisse de coco ou ses résidus de fabrication s'utilisent comme le beurre de karité. D'autres recettes évoquent l'utilisation de graisses animales.

La cire d'abeille et la cire de carnauba, composés gras de consistance solide à température ambiante, s'appliquent une fois fluidifiées (diluées dans un solvant, fondues ou en émulsion), au pinceau en couche de finition.

## principes et interprétation

Les graisses animales et végétales, tout comme les cires, sont des composés hydrophobes. Ajoutées à un mortier de terre, elles ont tendance à améliorer la résistance à l'eau en limitant son absorption.
La présence de graisses assouplirait la consistance du mortier frais.



Des enduits de terre rouge additionnée de beurre de karité recouvrent ces habitations de la ville de Ségou au Mali.

## recette n°10

 Beurre de karité

 Mali

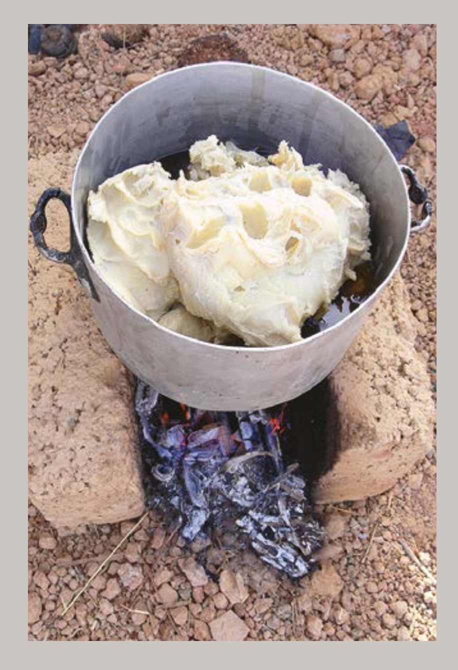
 Olivier Scherrer

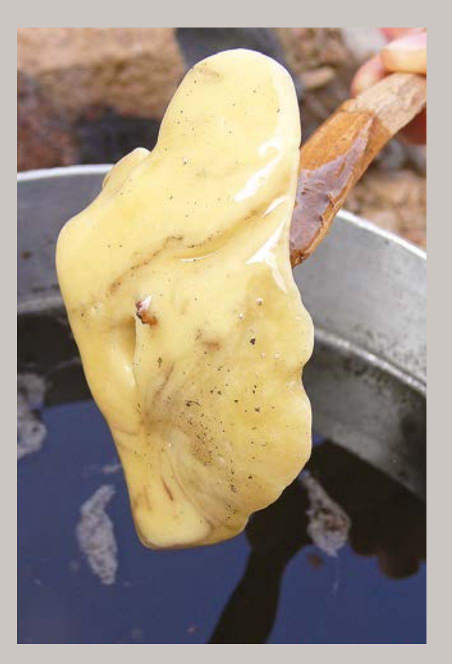
« Composition de l'enduit :

- 20 charrettes (tractées par un âne) de banco
- 10 sacs de balle de riz (volume 100 L/sac)
- 45 kg de beurre de karité

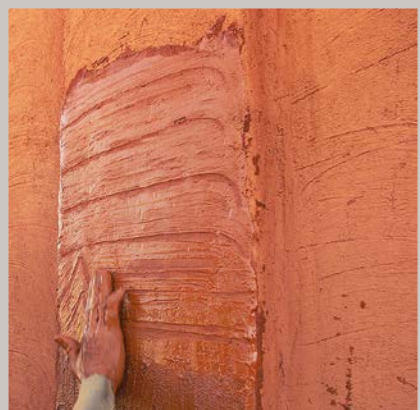
La terre est stockée à proximité du chantier, additionnée d'eau et malaxée de manière à constituer une pâte épaisse. La balle de riz est ajoutée [...]. Le mélange ainsi constitué est laissé à pourrir, en l'arrosant chaque jour, pendant une semaine minimum et deux semaines idéalement. [...] Le beurre de karité est ajouté au dernier moment après l'avoir fait fondre sur un fourneau, en malaxant le mélange autant que de besoin. »

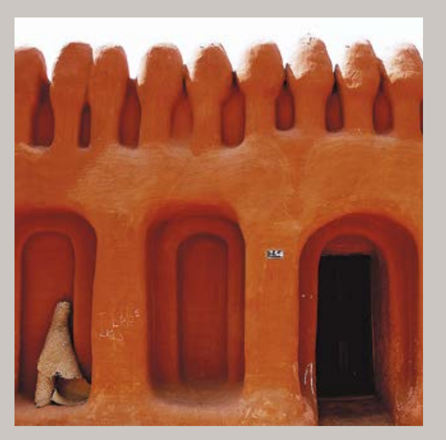
Scherrer, O Informations recueillies lors d'un séjour au Mali.
In : Fontaine, L., Anger, R., (2007). Série de questionnaires sur la stabilisation traditionnelle. NP.













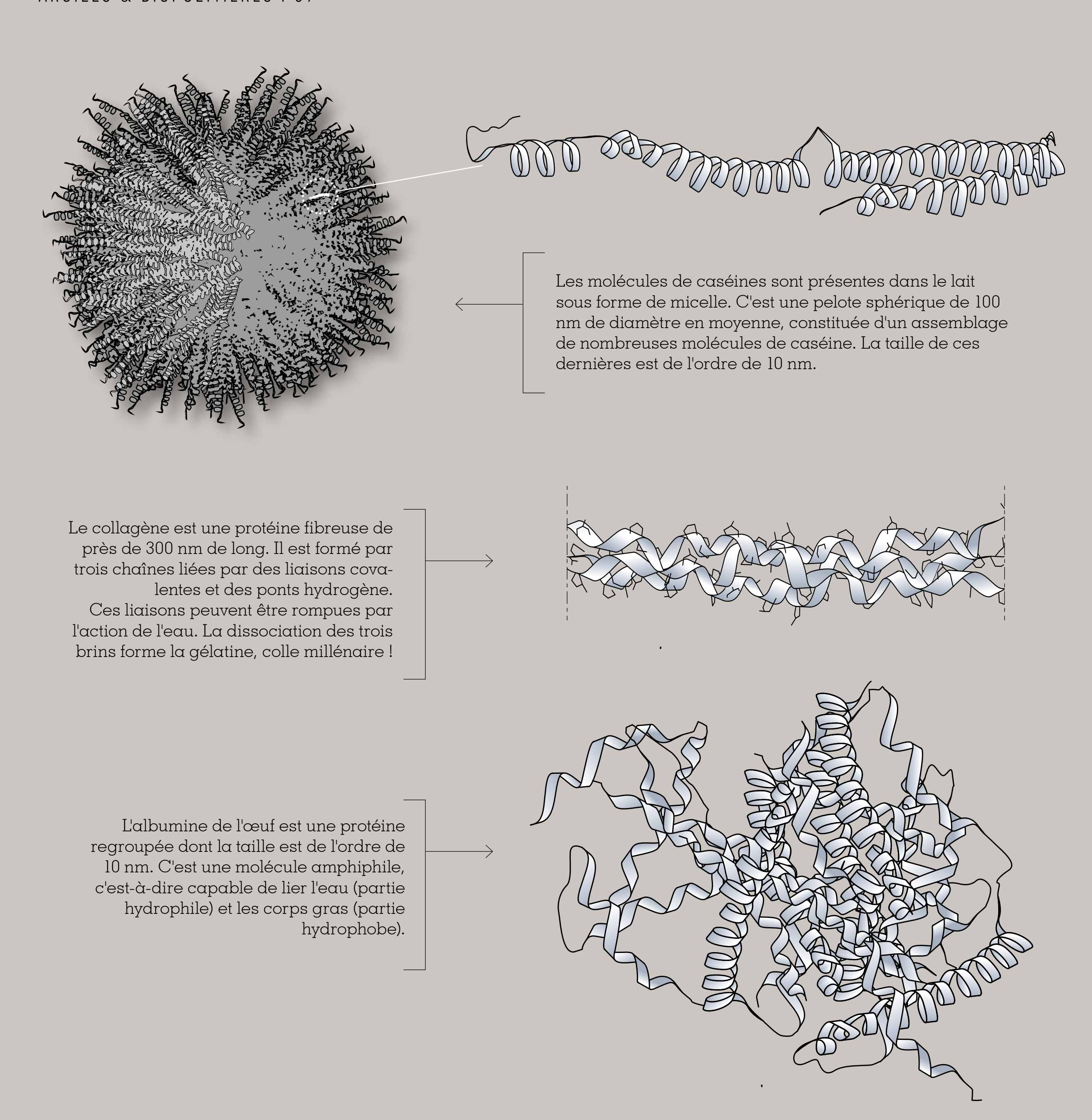
# Protéines

Les protéines sont des molécules essentielles pour le fonctionnement cellulaire tant dans le monde animal que dans le monde végétal. Elles ont des fonctions très variées suivant leur nature. Certaines ont un rôle structurel, comme le collagène (peau et os), d'autres assurent le transport de molécules, comme l'albumine (œuf et sang) et la caséine (lait).

Les protéines sont de longues chaînes dont les maillons sont des acides aminés. Un acide aminé est une petite molécule composée d'un carbone asymétrique, lié à une fonction carboxyle (COOH), une fonction amine ($NH_2$), un hydrogène (H) et un groupe (R). Cette chaîne latérale, R, identifie chaque acide aminé.
Il existe au total une vingtaine d'acides aminés distincts, composant toutes les protéines du vivant. Ces acides aminés ont des caractéristiques très différentes : certains sont polaires, d'autres portent des charges électrique, d'autres au contraire sont hydrophobes.

Une protéine de taille moyenne est constituée d'environ 200 acides aminés. Il existe deux grands types de protéines : les protéines fibreuses (collagène) et les protéines globulaires (caséine et albumine). Ces dernières adoptent une configuration spatiale particulière : leur longue chaîne se replie sur elle-même en prenant une forme bien précise. La fonctionnalité de la protéine, c'est-à-dire ses caractéristiques de surface, est déterminée par l'enchaînement des acides aminés et leur organisation spatiale. Les caractéristiques de surface des protéines sont très dépendantes des conditions du milieu : le pH et la force ionique. Les protéines sont généralement amphiphiles : elles ont une partie hydrophobe et une partie hydrophile.

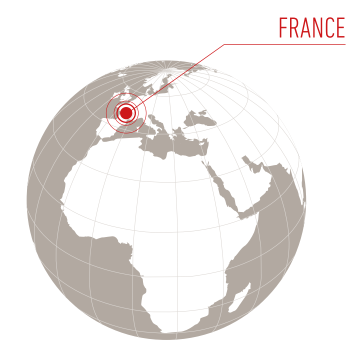
Les protéines interagissent fortement avec les argiles. Les parties hydrophiles s'adsorbent sur les particules argileuses recouvertes de fines couches de molécules d'eau, tandis que les parties hydrophobes restent à l'extérieur de la matière et donc au contact de l'air, formant une sorte de pellicule de surface qui repousse l'eau.
Les protéines sont de véritables colles des argiles et peuvent également présenter un effet hydrophobant en réduisant la sensibilité à l'eau des enduits en terre stabilisés.



Les molécules de caséines sont présentes dans le lait sous forme de micelle. C'est une pelote sphérique de 100 nm de diamètre en moyenne, constituée d'un assemblage de nombreuses molécules de caséine. La taille de ces dernières est de l'ordre de 10 nm.

Le collagène est une protéine fibreuse de près de 300 nm de long. Il est formé par trois chaînes liées par des liaisons covalentes et des ponts hydrogène.
Ces liaisons peuvent être rompues par l'action de l'eau. La dissociation des trois brins forme la gélatine, colle millénaire !

L'albumine de l'œuf est une protéine regroupée dont la taille est de l'ordre de 10 nm. C'est une molécule amphiphile, c'est-à-dire capable de lier l'eau (partie hydrophile) et les corps gras (partie hydrophobe).




Cette recette est pratiquée en Europe, notamment en France. La colle de caséine est connue depuis longtemps pour coller le bois. Elle était utilisée dans les assemblages des avions en bois pendant la première guerre mondiale.

À droite : cet enduit blanc dans la Chapelle de la Réconciliation à Berlin est stabilisé à la caséine.

# Caséine

## matière première

**La caséine est une protéine du lait. Il s'agit d'un émulsifiant qui donne des solutions (du type huile dans l'eau) très stables.**

## variantes

Les sources de caséine sont variées : le lait, le fromage blanc 0 % de matière grasse et la caséine en poudre. Les molécules de caséine sont naturellement organisées en petites pelotes. Pour fabriquer la colle de caséine, cette structure doit être cassée, les molécules de caséine dispersées. Lors de cette étape, le lait ou le fromage blanc perd sa couleur blanche pour devenir translucide. Certaines recettes emploient pour cette étape une base forte, comme l'ammoniaque, du carbonate d'ammonium ou du borax.

## principes et interprétation

Les molécules de caséine sont toutes petites en comparaison de la taille des pelotes de caséine. Une fois libérées par l'ammoniaque, ces molécules sont en partie chargées négativement. Elles conservent sur certains morceaux de leur chaîne leur caractère hydrophobe.

Ce sont donc des molécules amphiphiles : capables de lier à la fois l'eau et à la fois l'air ou des composés ou matériaux hydrophobes.

La présence d'une charge négative entraine, suivant les conditions de pH et de force ionique, une attraction ou une répulsion d'origine électrostatique. Suivant la charge portée par les argiles, la caséine peut donc avoir un rôle de dispersant (par neutralisation de charge) ou de colle en liant fortement les particules d'argile entre elles.

# recette n°11

 Caséine

 France

 Gisèle Taxil

Utiliser « 1 L de fromage blanc 0 % ! (Important). Ajouter 1 petit verre à gnôle d'ammoniaque. Bien mélanger. Laisser reposer une nuit.
Le lendemain on a un liquide transparent / translucide.
Ajouter 1 à 2 volume équivalent en eau. Bien homogénéiser. Teinter avec des pigments ou simplement de l'argile (en poudre).
À utiliser dans les 2 - 3 jours. [...] Appliquer à la brosse. »

Taxil, G. Recette de France à base de colle de caséine. In : Fontaine, L., Anger, R., (2007). Série de questionnaires sur la stabilisation traditionnelle. NP.











# Autres molécules complexes

Les tanins sont des molécules très répandues dans le règne végétal. Ils sont présents dans quasiment toutes les parties des plantes. Le mot tanin trouve son origine dans le nom celtique du chêne *tan*. L'utilisation des tanins pour convertir les peaux en cuir est connue depuis la haute Antiquité. Lors du tannage des peaux, les tanins établissent des liaisons entre les fibres de collagène (protéine) transformant les peaux fraîches en cuir imputrescible.

La noix de galle, très riche en tanin est une excroissance formée sur les tiges ou les feuilles de végétaux en réponse à la piqûre d'un parasite. Elle est utilisée historiquement dans la préparation de l'encre noire, broyée et mélangée à du sulfate de fer. Le complexe formé s'appelle du tannate de fer.

Bien que les tanins aient une chimie très variable selon leur origine botanique, ce sont tous des composés phénoliques construits à partir de la molécule de phénol, comprenant un groupe aromatique et un groupe hydroxyle.

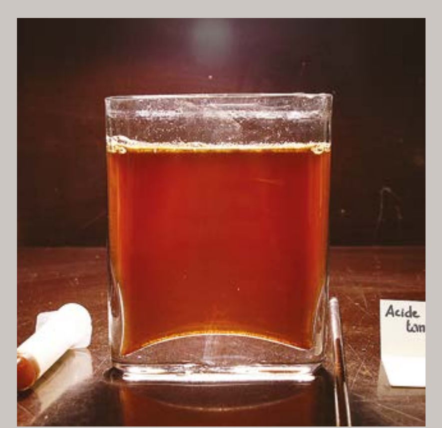
Les tanins comportent bien souvent de nombreux groupes hydroxyle (OH), proches les uns les autres, pouvant porter une charge négative pour certains pH. Dans cette configuration, cette extrémité de la molécule de tanin prend la forme d'une pince capable de fixer un cation. On parle de chélation des ions. La formation de complexes tanin-cation entraine une baisse de la force ionique du milieu. Cette dernière, associée à l'apparition de charges négatives peut conduire à la dispersion des argiles.

Si les tanins peuvent disperser les argiles dans des conditions adéquates de pH et de force ionique, ils sont surtout très utiles pour former des complexes de tannate de fer, libérant en solution des ions multivalents de fer.

L'effet des tanins sur la cohésion argiles est bien moins visible que celui des ions de fer. Ces ions métalliques ont une densité de charge si élevée qu'ils collent fortement les plaquettes d'argile entre elles et rendent la terre insensible à l'eau.













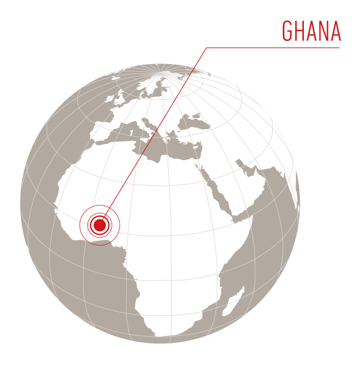


L'encre métallogallique est fabriquée à partir de tanin (ici du tanin en poudre) et de fer (ici, inséré à la seringue, le jus de clous restés longtemps dans du vinaigre). Lorsque les tanins sont au contact des ions ferriques, ils forment des complexes, facilement identifiables par leur opacité et leur couleur noire.

# Tanin



Les cosses de néré sont de couleur rouge-brun foncé.




La décoction des cosses de néré protège les décorations réalisées par les femmes kassena, dans le Nord-Ghana, à la frontière avec le Burkina Faso. Les cosses de néré sont également utilisées dans plusieurs pays de l'Afrique de l'Ouest pour stabiliser la terre.

## matière première

Le néré est un arbre de la famille des Fabacées. Les cosses, longues gousses suspendues en grappe et contenant de nombreuses graines noires enrobées de pulpe jaune, sont l'ingrédient principal de la décoction. La décoction de cosses de néré est désignée par différents noms locaux : *dawa-dawa* au Nord Ghana, les fruits sont appelés *assansi* ou *brâa* au sud du Burkina Faso où le néré est connu sous le nom de *tiapogo*, *makuba* ou *iru* et nommé *dorowa* au Nigeria.

## variantes

Certaines recettes mentionnent le caroubier (Ceratonia Siliqua) et l'algarrobo (Hymenaea Courbaril), espèces proches du néré (Parkia Biglobosa). Dans une autre recette, pratiquée au Burkina, des pierres de limonite (oxydes de fer) sont additionnées aux gousses d'acacia séchées dans le bain bouillant de la décoction.



Les pierres de limonite sont composées d'oxydes de fer.

Dans certains cas, des écorces *ampoa* et des feuilles rendant l'eau gluante sont ajoutées à la préparation.
La décoction obtenue est appliquée en badigeon sur la couche de finition (décorations de terres colorées, enduits ou sols).

## principes et interprétation

Le bain bouillant dans lequel trempent les cosses de néré, prend peu à peu une couleur allant de rouge foncé à ocre brun. Cette étape de préparation libère dans l'eau les tanins que contiennent les gousses.
Dans le cas de la recette des gousses d'acacia et des pierres de limonite, riches en oxyde de fer, le liquide obtenu est noir foncé : les tanins ont réagi avec les oxydes de fer. En effet, les tanins forment des complexes avec les ions fer(III) trivalents ($Fe^{3+}$) : le tannate de fer, repérable à sa couleur noir d'encre.
Si le jus de néré améliore un peu la résistance à l'eau des décorations kassenas, ce n'est en rien comparable avec l'action des ions métalliques trivalents qui rendent la terre quasiment insensible à l'eau.
Les cations trivalents, rassemblant trois charges positives sur un seul atome, sont capables de créer des ponts ioniques, liant fortement les plaquettes d'argiles entre elles. C'est cette forte cohésion qui permet à la terre de devenir insensible à l'eau.
On peut supposer que le rôle du tanin est de dissoudre le fer dans l'eau pour libérer des ions trivalents, disponibles pour interagir avec les argiles de la terre. Le succès des recettes à base de tanin réside donc dans la présence de fer en solution !

## recette n°11

 Décoction de cosses de néré

 Ghana

 Gisèle Taxil

« Les cosses de néré séchées, de couleur brune et brillante, trempent dans l'eau pendant une nuit, avant de mettre l'eau à bouillir le lendemain. La décoction, de couleur rouge foncé, doit être utilisée dans les deux jours. »

La décoction s'applique en plusieurs couches successives, à l'aide d'un petit balai végétal éclaboussant les décorations.





Joffroy, T., Taxil, G., and Moriset, S. (2004). Conservation of "Our Lady of Seven Sorrows Cathedral", Navrongo, Ghana: final report 1996-2004 (Navrongo Catholic Mission).









Etalement d'un enduit sur une table à choc

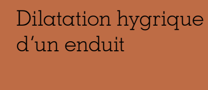
**ouvrabilité**



Pénétration et angle de contact d'une goutte d'eau sur une surface imprégnée

**efficacité**

**compatibilité**



Dilatation hygrique d'un enduit



**durabilité**

Exposition naturelle de blocs de terre imprégnés à la colle de farine



# Mesures d'évaluation

Une couche protectrice de la terre peut être appliquée soit sous la forme d'un enduit recouvrant la surface à protéger, soit directement sur la surface en pénétrant dans celle-ci. Cette couche protectrice doit répondre à des critères spécifiques :

- être facile à appliquer ;
- prouver sa résistance à la pénétration et à l'abrasion de l'eau ;
- présenter une bonne adhérence ou pénétration dans le support d'origine ;
- ne pas modifier les propriétés de transfert de vapeur d'eau du support ;
- présenter des propriétés mécaniques appropriées à l'interface avec le matériau non traité.

Ce chapitre présente les mesures d'évaluation qui visent à déterminer la faisabilité des méthodes de mesure, habituellement utilisées pour des supports en pierre, sur les enduits en terre stabilisés par des biopolymères. Il porte ensuite sur l'évaluation des propriétés des enduits de protection ainsi que leur évolution dans le temps.

Il s'articule donc autour de quatre axes de recherche principaux qui visent à définir :

- l'ouvrabilité de l'enduit, par des mesures simples de consistance et d'étalement de l'enduit ;
- l'efficacité de la couche protectrice, que ce soit vis-à-vis de l'eau liquide ou de la résistance à l'abrasion ;
- la compatibilité de la couche protectrice avec son support d'origine (esthétique, hygrique, mécanique) ;
- la durabilité de la couche protectrice, mais aussi du support qu'elle protège face à un environnement naturel agressif.

Pour chacun de ces axes de recherche, une ou plusieurs méthodes réalisables in situ et/ou en laboratoire sont décrites. Leur degré de discrimination, c'est-à-dire leur pertinence pour clairement choisir ou écarter des solutions, est comparé.
Pour expérimenter et déterminer la faisabilité du protocole lors de sa mise au point, trois biopolymères ont été mis en œuvre : soit en application sous forme de revêtement pouvant pénétrer directement dans le support (coating), soit en ajout dans l'eau de gâchage des enduits et appliqués sur le support (enduit).

# Ouvrabilité


méthodes réalisables en laboratoire


méthodes réalisables in situ

## définition

L'**ouvrabilité** est la propriété d'un mortier frais de se laisser aisément mettre œuvre (mélangé, façonné, moulé, travaillé, etc.).
Elle se mesure grâce à deux méthodes :

- la pénétration ou mesure de consistance
- l'étalement ou mesure d'ouvrabilité (ou de maniabilité)

*L'ajout d'un stabilisant peut changer la consistance du mortier frais, sa façon de s'étaler ou de s'écouler, facilitant ou, bien au contraire, rendant plus difficile sa mise en œuvre et son application. Pour mesurer cet impact, l'ouvrabilité est évaluée.*

## méthode

Les tests d'étalement et de pénétration apportent des indications complémentaires. D'une part, le mortier doit avoir une consistance suffisamment solide pour rester sur la truelle ou sur le mur sans s'écouler : cette propriété est évaluée par la mesure au cône de pénétration. D'autre part, l'enduit doit s'étaler facilement sous la pression exercée par la truelle et ainsi recouvrir une grande surface : cette seconde propriété est évaluée par la mesure d'étalement. Deux mortiers de consistance proche peuvent s'étaler de manière très différente. L'ajout de stabilisant organique a souvent un effet bénéfique sur l'ouvrabilité des mortiers.

Mesure de l'étalement d'un mortier frais.



## L'évaluation de la consistance par la mesure de pénétration

Les mesures de consistance sont réalisées par la méthode du cône de pénétration, norme EN 413-2 (1994). Ce test consiste à laisser tomber un cône de masse et de forme normalisées, dans une pâte contenue dans un récipient cylindrique. La profondeur de la pénétration du cône dans la pâte est mesurée : elle donne une idée de sa résistance à la déformation. Plusieurs mesures sont effectuées sur une pâte fraîche à différentes teneurs en eau.

**objectif**

La consistance d'une pâte passe par de nombreux états intermédiaires « mous », de solide à liquide, au fur et à mesure que la teneur en eau augmente, ce test permet de l'évaluer.





La consistance d'un mortier s'évalue par la méthode du cône de pénétration. La mesure de la profondeur de pénétration du cône dans la pâte permet d'évaluer cette consistance et de comparer l'impact de l'ajout de stabilisant.

## L'évaluation de l'ouvrabilité par la mesure de l'étalement

La mesure de l'étalement suit la norme EN 459-2 (2001). Pour des teneurs en eau croissantes, une pâte façonnée à l'aide d'un moule conique est soumise à des chocs successifs conduisant à son étalement. Selon cette norme, les quinze chocs sont exercés par le bras de la plaque support tombant brutalement d'une hauteur de 10 cm. L'étalement de la pâte est ensuite estimé via la différence de diamètre mesuré avant et après les chocs.






L'étalement d'un mortier frais, par la mesure de la différence de diamètres de la pâte entre avant (a) et après (b) l'application de quinze chocs permet d'en évaluer l'ouvrabilité.

# Efficacité



méthodes réalisables en laboratoire



méthodes non réalisables in situ

## définition

L'**efficacité** est la qualité de ce qui atteint un objectif attendu. La finalité de la couche protectrice peut varier selon le contexte. Bien souvent, l'amélioration de certaines propriétés de la terre est recherchée, afin de la rendre plus résistante, principalement à l'eau de pluie et à l'abrasion.

*La stabilisation est bien souvent réservée aux parties du bâti les plus exposées à l'érosion naturelle ou anthropogénique. Elle est employée pour renforcer les performances des couches protectrices face aux intempéries.*

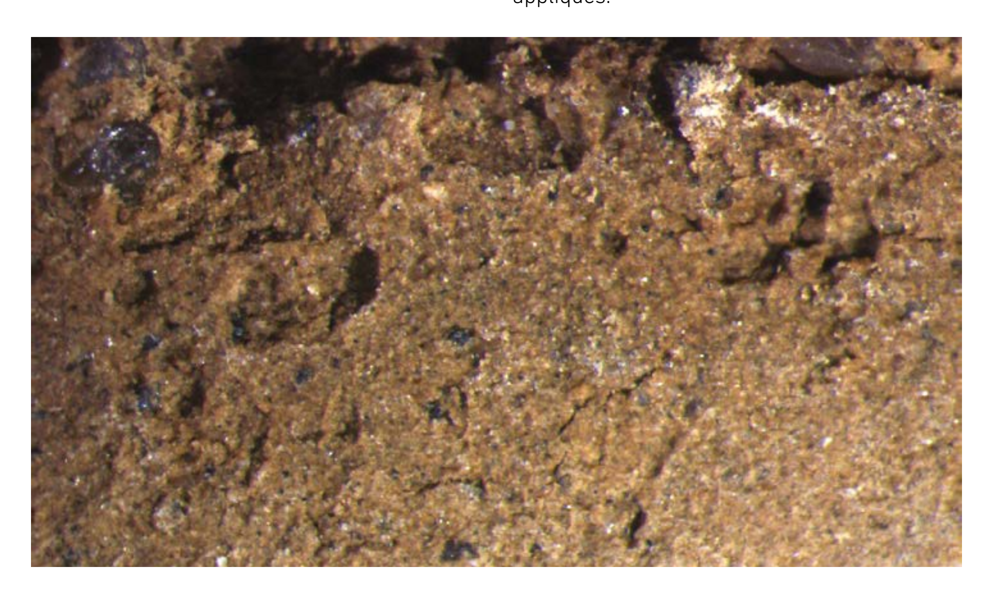
## Observation de la pénétration d'un biopolymère ou de l'adhérence d'un enduit

**méthode**

L'observation microscopique peut être multi-échelle, en allant de l'observation à la loupe binoculaire jusqu'à celle au microscope électronique à balayage (MEB).

**objectif**

Elle permet d'évaluer l'impact de l'ajout de biopolymères naturels tant sur le rendu esthétique des surfaces (changement de texture ou de couleur) que sur l'adhérence, la continuité ou la pénétration des produits appliqués.

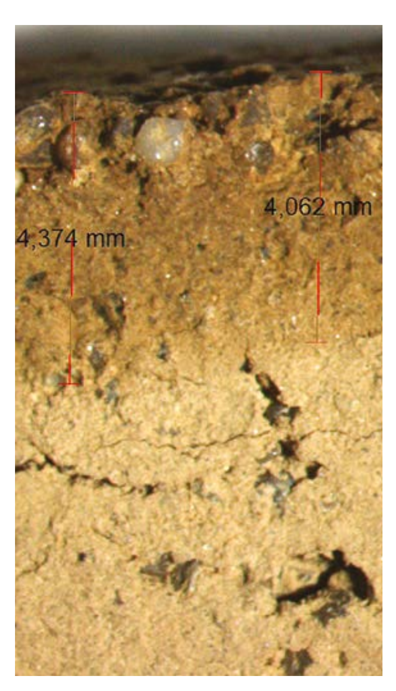


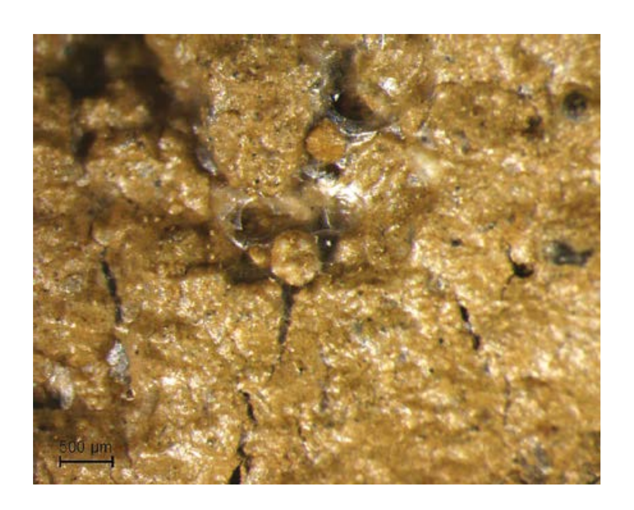
## L'évaluation de l'efficacité par l'observation en coupe

L'observation en coupe permet d'évaluer d'autres caractéristiques, comme la pénétration du stabilisant dans l'enduit support. Elle permet également de décrire l'interface entre le stabilisant et l'enduit support (frontière nette ou, au contraire, très diffuse), l'adhérence des deux couches à l'interface, la présence fissures, etc.

Ci-contre, il s'agit de l'observation en coupe d'un enduit de terre recouvert d'un coating à la colle de farine. Ci-contre, à droite, cet enduit a été recouvert d'un badigeon d'huile de lin. La terre devient plus sombre en présence d'huile de lin. Ce changement de couleur permet de suivre la pénétration de l'huile de lin dans l'enduit.






L'observation de surface du coating à la colle de farine révèle ici la formation d'un film brillant qui recouvre la surface.

## L'évaluation de l'efficacité par l'observation en surface

L'observation de la surface permet de voir comment le stabilisant, appliqué comme couche de finition sur le support (coating), se comporte après séchage ou exposition aux intempéries. Cette observation peut révéler, par exemple, la formation d'un film continu et brillant, la présence de craquelures ou microfissures, la répartition homogène du stabilisant ou encore une changement de teinte (assombrissement ou éclaircissement).

# Efficacité



méthodes réalisables en laboratoire



méthodes réalisables in situ

## définition

Une surface est dite **hydrophobe** lorsqu'elle repousse l'eau. Une goutte déposée sur cette surface prend une forme sphérique et ne s'étale pas.
L'angle de contact entre la goutte d'eau et la surface est alors supérieur à 90°.
Le caractère hydrophobe d'une surface est également évalué par la mesure de la durée d'absorption d'une goutte. La surface est davantage hydrophobe que le temps d'absorption de la goutte est long.

## Absorption d'une microgoutte

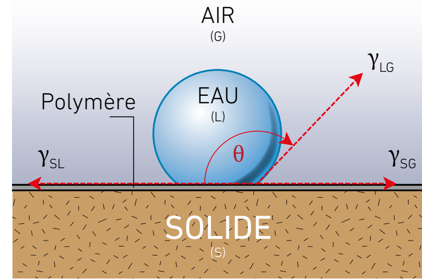
*Si une bonne absorption d'eau est parfois recherchée dans certains enduits, elle est fréquemment considérée comme source potentielle de désordres. Bien souvent, le recours à la stabilisation a pour but de réduire la capacité de l'enduit à absorber l'eau liquide.*

**méthode**
Le test de l'absorption d'une microgoutte consiste à déposer à la surface d'un enduit, une microgoutte de 10 µL puis d'observer deux paramètres : l'angle de contact formé par la goutte à la surface du matériau ainsi que le temps d'absorption/évaporation de la microgoutte.
Ce test dérive de la norme de la mesure de l'angle de contact EN 15802 (2010).

**objectif**
Ce test permet d'évaluer le caractère hydrophobe d'une surface, c'est-à-dire sa capacité à repousser l'eau. Il est particulièrement adaptée pour estimer l'effet perlant suite à un traitement hydrofuge. La surface sur laquelle repose la goutte est davantage hydrophobe que cette goutte est sphérique (dans le cas contraire, la goutte serait étalée et plane), que son angle de contact est grand.



Microgoutte de 10 µL déposée à la surface d'un bloc de terre imprégné de colle de farine




Mesure de l'angle de contact sur une surface hydrofugée

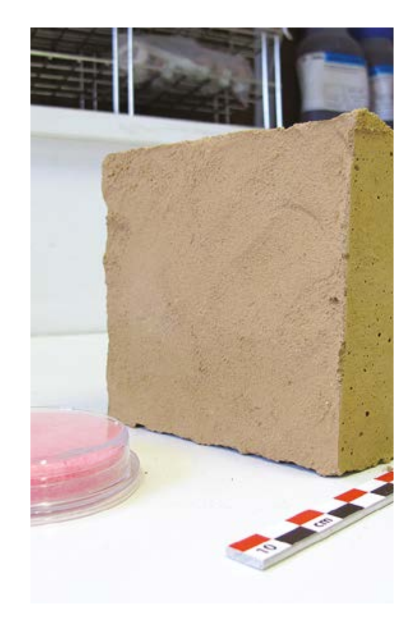
## ⦿ Mesure du coefficient de capillarité par contact à l'éponge

**méthode**

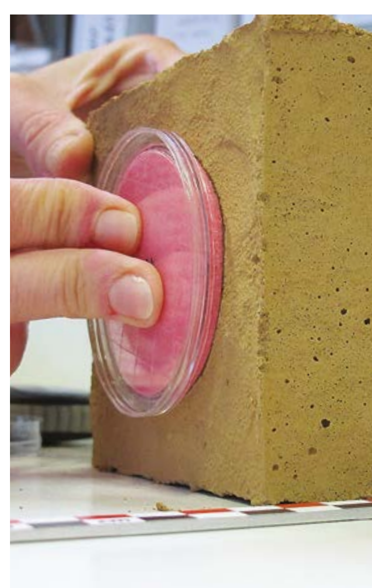
La mesure se réalise en appliquant une éponge spécifique préalablement mouillée pendant une durée définie (par exemple 90 s). Grâce au boîtier en plastique, la pression exercée sur l'éponge est constante d'un essai à l'autre : elle est contrôlée par le contact du rebord du boitier avec la surface à évaluer. Ensuite, la quantité d'eau imbibée est déduite par la différence de masse avant et après contact. Pour la bonne réalisation de l'essai, la quantité d'eau initialement ajoutée à l'éponge doit être telle que l'eau ne doit pas ruisseler sur la surface lors de l'application de l'éponge.

**objectif**

En mesurant la quantité d'eau liquide qui pénètre dans le matériau pendant une durée de contact définie, le coefficient de capillarité peut être calculé.
Cette méthode permet, par exemple, de comparer l'efficacité de plusieurs couches protectrices face à l'absorption d'eau. Les essais les plus absorbants seront écartés car moins performants.
Cet essai peut facilement être réalisé sur le terrain, à l'aide d'un chronomètre et d'une balance précise à 0,01 g.








La mesure du coefficient de capillarité peut être évaluée par la méthode de contact à l'éponge. L'éponge préalablement mouillée et pesée s'applique sur la surface en terre avec une pression constante et pendant une durée définie. L'éponge est pesée à nouveau. La quantité d'eau absorbée par la surface en terre est déduite des deux pesées.

# Efficacité



méthode réalisable en laboratoire



méthode réalisable in situ

## définition

La **cohésion** est la force qui unit les particules constituant la terre. Une terre cohésive est très collante dans son état frais, par exemple sous forme de mortier. Une fois sèche, elle résiste bien à l'abrasion et à l'arrachement. C'est le cas des terres argileuses. La stabilisation permet souvent d'atteindre une meilleure cohésion.

## Mesure de la cohésion de surface par l'essai d'arrachement au scotch

**méthode**

À l'aide d'une gomme (pour crayon de papier), un morceau de 5 cm de longueur de scotch double face de 2 cm de largeur, est appliqué sur le mur. Après 90 secondes, le scotch est enlevé et la masse de matériau arrachée par l'adhésif est pesée. La mesure est répétée entre cinq et dix fois exactement sur la même surface et reproduite au minimum trois fois sur une surface similaire. L'essai d'arrachement au scotch est particulièrement adapté pour des relevés in situ.

**objectif**

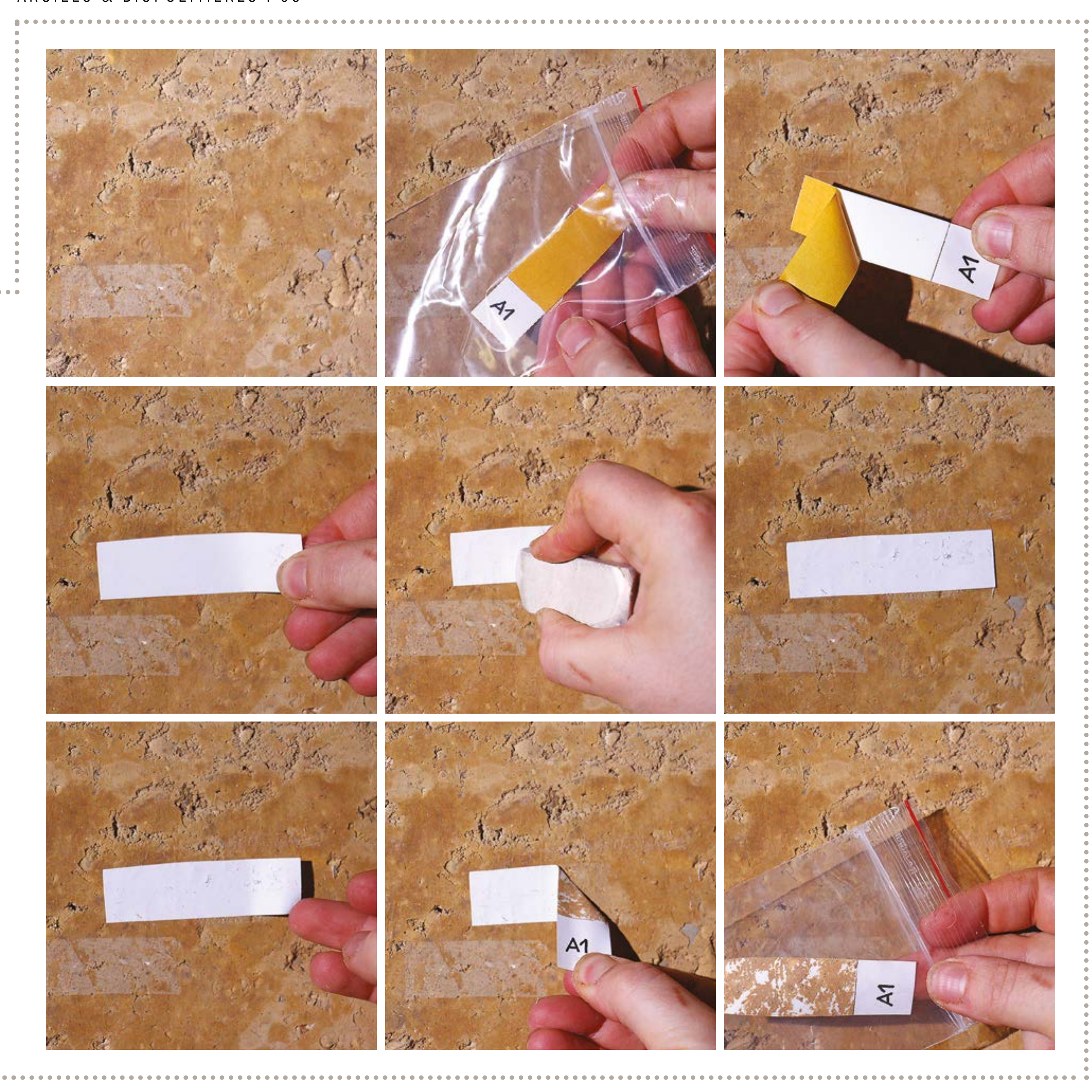
L'essai d'arrachement au scotch permet, à l'origine, d'évaluer la cohésion de surface des pierres altérées puis consolidées.
Les résultats s'expriment sous la forme d'un profil de masse de poudre arrachée en fonction du nombre de scotchs appliqués sur une même surface. Après traitement de consolidation le test permet de mesurer l'impact de l'effet consolidant en réduisant de façon notable la quantité de poudre arrachée.



Ci-dessus : peu de matériel suffit pour réaliser ce test : une paire de ciseaux, du scotch double face, une feuille de papier, une gomme et des sachets en plastique.

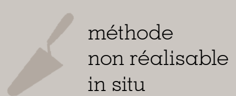



Page ci-contre : l'essai au scotch réalisé, ici, sur un support pierre permet d'évaluer la cohésion de la surface et sa résistance à l'arrachement.


A1
A1
A1
A1

# Compatibilité

méthode
réalisable
en laboratoire



méthode
non réalisable
in situ

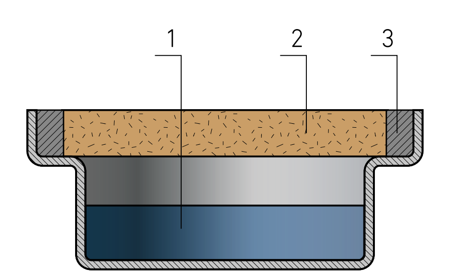
## définition

Un enduit de protection est **compatibile** avec son support en terre lorsque leurs propriétés sont proches.
En effet, des propriétés similaires sont requises afin d'éviter que l'enduit de protection ne devienne une cause d'endommagement pour l'enduit qu'il protège.
La compatibilité de la couche protectrice avec son substrat d'origine doit être tout aussi bien esthétique, hygrique (relatif à l'eau sous forme de vapeur) que mécanique.

*Afin que le traitement soit le plus pérenne et ne devienne pas une cause d'endommagement de son propre support, il est promordial de respecter certaines propriétés du substrat initial, notamment celles reliées aux transferts de vapeur d'eau.*

## Mesure de la perméabilité à la vapeur d'eau

**méthode**
Le dispositif de mesure de la perméabilité à la vapeur d'eau se rapproche de la norme NF EN 15803 (2010), selon la méthode de la coupelle humide. Les éprouvettes en forme de disques, préalablement façonnées, sont installées sur une coupelle remplie d'eau, imposant une humidité relative interne proche de 100 %. Le scellement s'effectue à l'aide de paraffine en prenant soin de recouvrir la surface externe des disques. Ce montage est ensuite placé dans une salle climatisée présentant des conditions telles que la température atteigne 19,9 ± 0,2°C et que l'humidité relative soit comprise entre 55 et 73 %. L'ensemble du montage est régulièrement pesé.
L'air emprisonné à l'intérieur de la coupelle, c'est-à-dire en contact avec la face interne du disque de terre, est davantage humide que l'air à l'extérieur, en contact avec la face externe du disque. Cette différence d'humidité relative entraine le passage d'eau, sous forme de vapeur, à travers le disque de terre, de l'intérieur vers l'extérieur. En conséquence, au fil de l'expérience, la masse de la coupelle dans son ensemble (récipient, eau liquide, disque de terre, paraffine) diminue.




Montage théorique du dispositif de mesure de la perméabilité à la vapeur d'eau
1 : Récipient avec solution
2 : Éprouvette
3 : Produit d'étanchéité





**objectif**

Ce suivi massique, lorsqu'il devient constant en fonction du temps, permet de calculer aussi bien la perméabilité à la vapeur d'eau que le coefficient de résistance de perméabilité à la vapeur d'eau, μ. Ce coefficient est sans unité ; plus il est élevé, plus la résistance à la vapeur d'eau est grande. Une valeur inférieure à 10 représente une bonne diffusion de la vapeur d'eau (μ est situé entre 6 et 10 pour les enduits en plâtre).

**observations**

Afin d'évacuer l'humidité de l'intérieur vers l'extérieur du mur, la couche externe du mur ne doit pas empêcher le passage de la vapeur d'eau. Sa résistance de perméabilité à la vapeur d'eau, μ, ne doit donc pas être trop élevée par rapport à celle du support qu'elle protège, sans quoi, l'eau resterait piégée à l'intérieur du mur. En conséquence, pour une bonne compatibilité à la vapeur d'eau des surfaces traitées, une augmentation égale ou inférieure à 20% de la valeur avant traitement est tolérée.

En général, la présence de biopolymères à caractère hydrophobe, comme l'huile de lin, freine la perméabilité à la vapeur d'eau. Malgré cette diminution, correspondant à un μ plus élevé, les valeurs de perméabilité restent tout de même assez faibles : la vapeur d'eau continue de bien circuler dans l'enduit en terre stabilisée.

La coupelle métallique sur laquelle est scellé le disque de terre, est remplie d'eau : elle impose une humidité relative proche de 100 % sur la face interne du disque en terre.
La différence d'humitidé imposée aux deux faces du disque entraine la migration d'eau sous forme de vapeur depuis l'intérieur de la coupelle vers l'extérieur.
Une pesée régulière de ce dispositif permet de calculer la perméabilité à la vapeur d'eau de l'enduit, ainsi que son coefficient de résistance de perméabilité à la vapeur d'eau, *μ*.
Pour être compatibles, l'enduit et son support doivent avoir des *μ* assez proches.

# Compatibilité


méthodes réalisables en laboratoire


méthodes réalisables in situ

## définition

L'**élasticité** d'un matériau est le domaine de contraintes que l'on peut lui imposer, de façon à ce qu'il se déforme de manière réversible. Au-delà de la limite d'élasticité, le matériau se déforme de manière irréversible, son endommagement conduit bien souvent à la rupture.

## Mesure du module d'élasticité

*Pour une meilleure compatibilité entre le support et la couche protectrice, il est primordial que les principales propriétés mécaniques des deux matériaux, soient proches. Par exemple, il est important qu'ils aient un comportement semblable en déformation lorsqu'ils sont soumis à une même sollicitation. Dans le cas contraire, une contrainte mécanique en cisaillement peut se produire à l'interface des deux matériaux accolés, engendrant la propagation de fissures, voire le décollement des surfaces et la ruine de l'un des deux matériaux.*

**méthode**

L'appareil de mesure utilisé est du type GrindoSonic. Il applique une impulsion sur l'échantillon de terre qui se met à vibrer. L'analyse de cette vibration renseigne sur les propriétés mécaniques de l'échantillon et donne accès au module élastique.

Les appareils de mesure, en vitesse du son, sont en général des appareils portatifs et adaptés à des mesures de terrain.

**objectif**

Afin de s'assurer d'un comportement mécanique semblable, certaines grandeurs intrinsèques des matériaux peuvent être mesurées. C'est le cas du module élastique, aussi appelé module d'Young. Il représente la charge maximale que le matériau peut supporter en se déformant de manière élastique, c'est-à-dire avant qu'il ne commence à se déformer de manière irréversible.




L'impulsion appliquée à l'aide du marteau sur le matériau le fait vibrer. L'enregistrement de cette vibration avec un micro adapté permet, par un calcul, d'obtenir les caractéristiques élastiques de ce matériau.

## Mesure de la variation dimensionnelle hydrique ou hygrique

*Les argiles de la terre réagissent avec l'eau liquide (comportement hydrique) ainsi qu'avec l'eau vapeur ou atmosphérique (comportement hygrique). L'adsorption de molécules d'eau dans le réseau cristallin de ces minéraux entraine un gonflement lors de l'humidification. À l'inverse, l'évaporation de l'eau entraine le retrait des argiles lors du séchage. Dans le cas où, deux matériaux en contact gonflent ou se rétractent de manière différente sous les mêmes conditions environnementales, une contrainte mécanique naît à l'interface des deux matériaux, de la même façon que pour des valeurs de module d'élasticité trop éloignées.*

**méthode**

Si la mesure de dilatation hygrique nécessite un appareillage lourd de laboratoire, comme une enceinte climatique et un capteur de déformation, la mesure de retrait hydrique est facilement mise en œuvre tant en laboratoire que sur le terrain. Il s'agit simplement de mouler une pastille de pâte fraîche et de mesurer les dimensions finales de la pâte sèche.

**objectif**

La mesure de la variation dimensionnelle, c'est-à-dire du retrait, après ajout de biopolymère est donc primordiale à la vue des futures conditions environnementales que subira la surface traitée. Pour une meilleure compatibilité avec le support, l'enduit stabilisé ne devrait pas présenter un retrait plus important que l'enduit non stabilisé.





La mesure du retrait au séchage de pastilles de mortiers argileux est un élément d'évaluation de la bonne compatibilité de l'enduit stabilisé avec son support.

# Durabilité


méthodes en partie réalisables en laboratoire


méthodes réalisables in situ

## définition

La **durabilité**, qualité de ce qui dure longtemps, est une notion discutable car l'échelle du temps est une échelle difficilement appréhendable.
Dans le cas de la conservation d'une architecture par l'application d'une couche protectrice, il s'agit plus simplement de minimiser ou d'espacer l'entretien sur le bâtiment.

## L'exposition naturelle à l'environnement

### méthode

La durée d'exposition est variable selon les cycles climatiques du site d'exposition. L'action de la pluie, l'exposition aux UV ainsi que l'abrasion due au vent sont des facteurs naturels déterminants pour cette évaluation.
Il s'agit ensuite de procéder à des observations macroscopiques documentées par des photographies des états de surfaces et de cohérence des couches entre elles. Des examens complémentaires peuvent appuyer ces observations afin d'évaluer la durabilité des couches de protection en comparant, par exemple, l'évolution de l'angle de contact à la microgoutte sur la surface, les mesures de capillarité à l'éponge ou encore de cohésion de surface grâce au test du scotch. D'autres essais, plus pointus, peuvent être réalisés en laboratoire comme la mesure de rugosimétrie de surface.

### objectif

L'exposition aux conditions environnementales est un moyen simple et pertinent pour évaluer la durabilité des enduits en terre stabilisés par l'ajout de biopolymères naturels. Cette méthode est, ici, réalisée sur des portiques dont l'inclinaison est de 45°.



## Les observations macroscopiques

**méthode**

Les observations macroscopiques consistent à comparer les surfaces simplement en les regardant à l'œil nu. Elles sont également documentées par des photographies des états de surface. Ces observations macroscopiques sont généralement complétées par d'autres essais, comme la mesure d'absorption capillaire avec le test de l'éponge.

**objectif**

Elles sont toujours comparées, sur une échelle de temps et de conditions d'expositions, à un échantillon témoin.

Suivi photographique des surfaces recouvertes de colle de farine en fonction de la durée d'exposition pour des conditions naturelles









# Bilan des mesures d'évaluation

Les protocoles d'essais décrits dans ce chapitre aident donc à déterminer :

- les modifications de consistance du mortier frais et son ouvrabilité à l'application ;
- les réponses à des critères d'efficacité, comme l'optimisation de la résistance à la pénétration d'eau de pluie ou à l'abrasion ;
- les compatibilités avec le matériau support d'origine, permettant notamment une « respiration » du matériau et des propriétés mécaniques similaires ;
- une réelle optimisation de la durabilité du support protégé face à un environnement naturel agressif.

*Les méthodes d'évaluation les plus adaptées aux enduits en terre sont classées par ordre de pertinence dans le tableau cidessous.*
*Si les méthodes d'évaluation testées sont praticables en laboratoire, toutes ne sont pas transposables sur le terrain.*

| OUVRABILITÉ | EFFICACITÉ | COMPATIBILITÉ | DURABILITÉ |
|---|---|---|---|
| | **Contact à l'éponge**<br>**Résistance à l'abrasion**<br>*(brosse métallique et scotch)* | **Module élastique** | **Exposition naturelle**<br>**Contact à l'éponge** |
| **Pénétration**<br>**Étalement** | **Absorption d'une microgoutte**<br>**Porosimètre mercure** | **Perméabilité à la vapeur d'eau**<br>**Dilatation hygrique** | **Rugosimétrie**<br>**IRTF**<br>*(Infra-Rouge à Transformée de Fourier)* |
| | Angle de contact | Retrait | |
| | MEB<br>*(microscope électronique à balayage)* | Wedge splitting | |

# ANNEXE :
## FORMULES DE CALCUL

**angle de contact**

L'angle de contact est défini par l'équation d'Young pour une surface plane, où γ représente la tension de surface entre l'eau à l'état liquide (l), le solide (s), ici la terre, et l'air (g) :

$$\gamma_{lg} \cos\theta + \gamma_{ls} = \gamma_{sg}$$

**perméabilité δ à la vapeur d'eau**

$$\delta = C \frac{d}{A} P_v$$

Avec :
δ = perméabilité à la vapeur d'eau en kg/m.s.Pa
d = épaisseur en m
A = aire de surface en $m^2$
$P_{(v)}$ = différence de vapeur partielle entre les deux surfaces du matériau en Pa
C = coefficient de proportionnalité entre la perte de masse et le temps.

**coefficient de capillarité** (test du contact à l'éponge)

$$Wa = \frac{P_i - P_f}{23,76t}$$

Avec :
Wa en $g/cm^2$.min
t = temps de contact en min
$P_i$ = poids initial en g
$P_f$ = poids final en g
23.76 = surface de l'éponge en $cm^2$

**coefficient de résistance μ à la vapeur d'eau**

Ce coefficient est sans unité, plus il est élevé, plus la résistance à la vapeur d'eau est grande. Il est calculé à partir du rapport de la perméabilité à l'air à sa propre valeur de perméabilité :

$$\mu = 0.09/\delta$$

**module élastique**

Le module élastique d'après les ondes Vp se calcule selon la loi suivante :

$$E - D\gamma n = \rho V_p^2 \frac{(1+\upsilon)(1-2\upsilon)}{(1-\upsilon)}$$

Avec :

$$\nu = \frac{1}{2} \frac{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}{\left(\frac{V_p}{V_s}\right) - 1}$$

υ = coefficient de Poisson
ρ = densité apparente ($g/cm^3$)
$V_p$ = vitesse des ondes en compression
$V_s$ = vitesse des ondes en cisaillement

**retrait hydrique**

$$R\% = 100(D_i - D_f) / D_i$$

Avec :
R = le retrait en %
$D_i$ = dimension initiale
$D_f$ = dimension finale



# Applicabilité

## les enduits sacrificiels sur les sites archéologiques en terre

Le champ d'application des mesures d'évaluation est potentiellement très large. Il peut être utile aussi bien pour la conservation du patrimoine en terre classé ou inscrit dans le monde, que pour la rénovation d'architectures vernaculaires habitées, voire même pour la construction contemporaine qui, de plus en plus, fait appel à ce matériau naturel. Dans chaque situation, les avantages qu'offre une stabilisation organique des surfaces en terre peuvent en effet être considérables. Il est dès lors important d'être capable d'en mesurer facilement les apports avec des tests de terrain ou de laboratoire fiables et à la portée des praticiens ou des utilisateurs. Ceux-ci pourront ainsi ajuster progressivement la composition des mélanges argiles / biopolymères qu'ils utilisent en se référant aux résultats des tests d'essai.

Un domaine particulièrement adapté d'applicabilité de ces protocoles d'essais est celui de la conservation des architectures de terre sur les sites archéologiques. L'une des pratiques les plus répandues dans le monde afin de protéger ce type de vestiges consiste en effet à recouvrir les structures en ruine d'un enduit dit « sacrificiel », très souvent amendé de composants organiques. Cet enduit protège les parties originales en subissant à leur place les facteurs d'érosion naturels et humains.

Ce type d'enduit est utilisé sur le site archéologique de Sarazm, au Tadjikistan, inscrit depuis 2010 sur la Liste du patrimoine mondial. Les recherches conduites sur ce site ont permis de tester une partie des protocoles d'essais et de faire une première série de mesures de terrain, simples et efficaces, qui ont démontré l'intérêt de la stabilisation naturelles des enduits.

TADJIKISTAN

# Tests d'enduits en terre stabilisés
## pour le site archéologique de Sarazm au Tadjikistan



### Quelques éléments de contexte

Le site proto-urbain de Sarazm se situe au Tadjikistan, à l'ouest de la ville de Pendjikent, proche de la frontière avec l'Ouzbékistan et de la ville de Samarkand. Découvert en 1976, il s'étend sur une surface connue de 50 ha dans la vallée du Zeravchan, à 910 mètres d'altitude. Les seize secteurs fouillés, dont cinq sont aujourd'hui protégés par des couvertures métalliques ont révélé des installations appartenant à la civilisation proto-urbaine eurasienne qui s'est développée aux périodes du chalcolithique et du bronze moyen (IV-III mill. BC).
Les vestiges d'architectures comprennent des logements, des ateliers, des espaces de stockage et des édifices monumentaux. À l'exception de quelques soubassements en galets, ils sont entièrement construits en terre, selon deux techniques principales : la brique de terre et une forme de bauge, localement appelée pakhsa. Ces techniques persistent dans l'architecture traditionnelle de la région de Pendjikent même si plus de 90% du territoire est montagneux.




Vestiges d'architectures en terre à Sarazm, secteur 11



La balle de riz est utilisée dans la préparation de l'enduit de protection en terre.

## Mise au point d'un enduit de terre stabilisé avec de la balle de riz

Les terres utilisées sur le site de Sarazm sont du type argilo-limoneuses, avec de très faibles proportions de sables et graviers. Le même type de terre est encore utilisé dans la construction contemporaine. Les artisans y ajoutent de la balle de riz, disponible en grandes quantités après la saison des récoltes et du décorticage des plantes de riz pour en extraire les grains. Certains ajoutent également de la paille pour limiter les fissurations qui apparaissent au séchage. Dans une phase initiale, nous avons suivi ces recommandations en réalisant ce mélange « traditionnel » de terre comprenant dix volumes de terre, trois volumes de balle de riz en phase de pourrissement et un volume de paille. L'eau puisée dans le canal d'irrigation longeant le site est ajoutée jusqu'à obtenir une consistance plastique du mélange. L'ensemble est ensuite recouvert d'une bâche plastique qui contient l'humidité pendant un minimum de quatre jours avant utilisation.

La balle de riz est ajoutée en dernière étape de la préparation.

# Test de l'éponge de contact

Afin d'optimiser les performances de cet enduit traditionnel, une partie du protocole d'essai a été testé sur le terrain. Il s'agit de la mesure d'absorption capillaire donnée par le test de l'éponge, qui s'est révélée très simple et pratique d'utilisation. Le protocole mis en place visait plus particulièrement à évaluer, in situ, l'efficacité de la stabilisation à base de balle de riz des enduits, en fonction de la quantité de balle de riz ajoutée au mélange et du temps de cure humide (pourrissement) de celui-ci.
Six échantillons d'enduits contenant des proportions croissantes de balle de riz et de paille et laissés en cure humide de un à onze jours ont été testés comparativement. Pour chaque échantillon, une couche d'enduit d'environ deux centimètres a été appliquée sur deux briques de terre. Après vingt-quatre heures de séchage, les tests ont été réalisés avec deux séries de mesures pour chaque brique. La méthode qui se base sur la différence de poids d'une éponge mouillée, avant et après avoir été appliquée sur la surface testée a permis de calculer la quantité d'eau transférée de l'éponge à l'enduit (Wa).

Les résultats ont montré une diminution sensible de la quantité d'eau absorbée par les enduits de terre lorsque la balle de riz est ajoutée au mélange. En effet, l'enduit terre + balle de riz a absorbé jusqu'à trois fois et demi moins d'eau que l'enduit de terre sans ajout de balle de riz. De plus, la diminution de quantité d'eau absorbée par l'enduit est apparue progressive, en fonction du nombre de jours de cure humide du mélange.

Nous avons ainsi ajusté la préparation des enduits traditionnels en augmentant légèrement la proportion de balle de riz et de paille et surtout en prolongeant le temps de cure humide à environ sept jours, jusqu'à ce qu'une odeur forte de pourrissement se fasse ressentir. Ce paramètre, qui n'était plus perçu par les ouvriers du site comme important pour la qualité des enduits, venait en effet à se réduire pour ne pas dépasser un à deux jours.





Le test à l'éponge permet d'évaluer la sensibilité à l'eau des enduits en terre sur des surfaces verticales et horizontales




Le test du contact à l'éponge permet de comparer l'absorption capillaire de différents mélanges d'enduit. Une fois l'éponge mouillée et essorée, on verse dessus une certaine quantité d'eau, puis l'éponge est pesée. Elle est ensuite appliquée sur la surface. Ainsi pressée, une partie de l'eau de l'éponge passe dans l'enduit en terre. L'éponge est à nouveau pesée. La différence entre les deux pesées indique la quantité d'eau absorbée par l'enduit. On peut ensuite observer le temps de séchage. Bien souvent, l'enduit le moins absorbant, c'est-à-dire le moins sensible à l'eau, est recherché.



# Application de l'enduit stabilisé

Les principes de conservation préventive des vestiges sont privilégiés pour ce site du patrimoine mondial. Toutes les interventions réalisées se veulent volontairement discrètes et basées sur une analyse détaillée des circonstances et processus de dégradation. Il s'agit globalement de conserver les vestiges dans leur état de ruine en limitant au maximum les facteurs d'érosion. Le principe de l'enduit sacrificiel, appliqué sur plusieurs secteurs du site, répond pleinement aux exigences de l'approche énoncée.

La mise en oeuvre commence par le retrait des parties décollées en surface afin de retrouver un support dur et cohésif sur lequel sera appliqué l'enduit de protection. Il s'agit de retirer les parties pulvérulentes qui se décrochent du mur afin d'assurer que l'enduit vienne adhérer sur un support sain. Cette opération se fait délicatement à la main et avec un balai ou une brosse souple.

L'enduit sacrificiel est ensuite appliqué en parties sommitales des murs, mais aussi sur les faces, lorsque celles-ci sont très exposées aux intempéries. Ces enduits réalisés en deux couches sont destinés à subir les érosions à la place du mur d'origine. Ils nécessiteront eux-mêmes un entretien régulier dont la fréquence sera définie en fonction des vitesses de dégradation observées. En améliorant le tenue des enduits face aux pluies et aux problèmes d'érosion liés aux circulations d'eau, la stabilisation organique permet d'espacer dans le temps les phases d'entretien. Ce simple aspect facilite grandement la gestion du site qui ne nécessite plus une mobilisation permanente des équipes de conservation à chaque période pluviale.

Les ouvriers de Sarazm appliquent des enduits stabilisés, nouvellement mis au point, sur les murs en briques crues découverts en fouille.





# Conclusion & perspectives

Le projet PaTerre+ a permis de réaliser un inventaire des pratiques traditionnelles qui font appel aux interactions physico-chimiques entre les molécules constitutives des stabilisants organiques d'origine naturelle et les argiles de la terre. L'observation des pratiques de terrain confrontées à la littérature scientifique met en évidence des tendances générales du comportement des stabilisants et des utilisations qui en découlent.

Tout d'abord, les recettes à partir des polysaccharides sont les plus répandues. La cellulose, présente principalement dans les mélanges à base de fibres fermentées et de bouses de vaches, s'emploie sur tous les continents. L'utilisation de colle d'amidon se répand de plus en plus, notamment en Europe ; l'amidon pur de la fécule de pomme de terre ou du tapioca est, par ailleurs, plus efficace que l'emploi de farine de blé classique. Les gels ou gommes de polysaccharides permettent généralement d'assouplir la consistance du mortier frais, ce qui facilite sa mise en œuvre.

Les composés gras sont aussi assez fréquemment employés. Les huiles, cires et beurres, ont tendance à réduire les propriétés d'absorption d'eau et à durcir les enduits en terre avec le temps.

Les recettes à base de protéines, moins courantes, sont pourtant des valeurs sûres. Les colles de caséine à base de fromage frais sont de véritables colles des argiles. Le blanc d'œuf, dont l'utilisation est marginale, augmente fortement la résistance à l'abrasion de la terre et apporte un effet déperlant : l'absorption d'eau liquide est fortement diminuée, les gouttes d'eau ruissellent à la surface.

Enfin, les recettes à base de tanins sont spécifiques à une aire géographique au centre de l'Afrique de l'Ouest, s'étendant du Burkina Faso au nord du Cameroun. L'efficacité des tanins dans la réalisation d'enduit de protection réside dans leur capacité à dissoudre le fer, qui, interagissant sous forme d'ions avec les argiles, rend la terre quasiment insensible à l'eau.

Étonnamment, les recettes qui pourraient être les plus efficaces ne sont pourtant pas les plus répandues. Cela s'explique par les liens très forts entre ces pratiques traditionnelles et leurs contextes naturels et culturels.

La stabilisation des surfaces en terre à partir d'adjuvants naturels gagnerait à être mieux connue tant la diversité de recettes et les avantages qu'elles offrent sont considérables Ce document de valorisation du projet PaTerre+ a donc pour vocation de susciter la multiplication d'expérimentation par et pour les architectes, constructeurs, conservateurs et restaurateurs. C'est en adaptant et en créant de nouvelles recettes que des solutions pour des applications à grande échelle pourront être proposées.

Dans cette perspective, des mesures d'évaluation, sont proposées. Elles s'inspirent des méthodes d'évaluation des supports en pierre, mais ont été mises au point en testant et vérifiant leur pertinence sur des supports en terre. Elles permettent d'évaluer l'ouvrabilité, l'efficacité, la compatibilité ainsi que la durabilité des enduits de protection en terre stabilisés avec des biopolymères naturels.

Les premiers retours d'applications sur le terrain, notamment dans le domaine de la conservation des architectures de terre sur les sites archéologiques, sont prometteurs. Ces pratiques peuvent donc être utiles pour la conservation du patrimoine en terre classé ou inscrit un peu partout dans le monde, autant que pour la rénovation d'architectures vernaculaires habitées.

Dans chaque situation, les avantages qu'offre une stabilisation organique des surfaces en terre peuvent en effet être nombreux. Il est dès lors important d'être capable d'en mesurer facilement les apports avec des tests de terrain ou de laboratoire fiables et à la portée des praticiens ou des utilisateurs. Ceux-ci pourront ainsi ajuster progressivement la composition des mélanges argiles/biopolymères qu'ils utilisent en se référant aux résultats des mesures d'évaluation. Il reste toutefois que d'une certaine façon, ces pratiques modifient la matérialité des patrimoines. Cela pourrait ne pas être acceptable en prenant en compte certains critères de jugement de leur l'authenticité, notamment en matière de pratique traditionnelle de conservation dont l'aspect social (par exemple rassemblement des communautés pour des travaux collectifs) pourrait primer sur l'aspect technique (la durabilité et fréquence d'entretien). Ceci devrait donc aussi être vérifié, et ce à la lumière des nouvelles chartes et recommandations internationales en matière de conservation.

Mais le domaine d'application est potentiellement encore plus large, notamment dans la perspective d'application pour la construction contemporaine qui, de plus en plus, recherche la valorisation de matériaux naturels réversibles mais quand même suffisamment solide. À long terme, on peut imaginer que les matériaux obtenus puissent être normalisés, au moins à certains niveaux, ce qui permettra aussi de faciliter les rapports avec les bureaux d'études et les promoteurs. Mais ceci nécessitera, entre autres, des travaux de recherche plus systématiques et approfondis.

# Bibliographie

RÉFÉRENCES SÉLECTIONNÉES


## inventaire des recettes

### stabilisation organique

Anger, R. (2011). Approche granulaire et colloïdale du matériau terre pour la construction [en ligne]. Thèse de doctorat. Ed. INSA de Lyon.

Anger, R., Fontaine, L., Houben, H., Doat, P., Van Damme, H., Olagnon, C., and Jorand, Y. (2008). La terre, un béton comme les autres ? Quelques mécanismes de stabilisation du matériau terre. Ed. GCI.

Avrami, E., Guillaud, H., and Hardy, M. (2008). Terra Literature Review: An Overview of Earthen Architecture Conservation. Ed. The Getty Conservation Institute.

Beas G. M.I (1991). Traditional architectural renders on earthen surfaces. Ed. University of Pennsylvania.

Fontaine, L., and Anger, R. (2009). Bâtir en terre. Du grain de sable à l'architecture. Ed. Belin Cité des Sciences et de L'industrie.

Houben, H., and Guillaud, H. (1995). Traité de construction en terre. Ed. Parenthèses.

Ma, X., Bruckard, W.J. (2010). The effect of pH and ionic strength on starch–kaolinite interactions. In : International Journal of Mineral Processing. avril 2010. Vol. 94, n° 3–4. Ed. Elsevier.

Perego, F. (2005). Dictionnaire des matériaux du peintre.Ed. Belin.

Theng, B.K.G. (2012). Formation and properties of clay-polymer complexes. Ed. Elsevier.

### algue

Isomura, M. (1998). Le mur en terre japonais (Grenoble: EAG).

### aloe

Buson, M.A. (2009). Krafterra. Desenvolvimento e anàlise preliminar do desempenho técnico de componentes de terra com a incorporação de fibras de papel kraft provenientes de reciclagem de sacos de cimento para vedação certical. Ed. Universidade de Brasilia.

### amidon

Gouttry B (2010). Peintures et enduits bio. Conseils, recettes de fabrication et mise en oeuvre. Ed. Terre Vivante.

Guelberth, C.R., and Chiras, D. (2003). The Natural Plaster Book : earth, lime and gypsum plasters for natural homes. Ed. New Society Publishers

Weismann, A., and Bryce, K. (2008). Using Natural Finishes: lime- & earth-based plasters, renders & paints. A step-by-step guide. Ed. Green Books.

### cactus

Heredia Zavoni, E.A., Bariola Bernales, J.J., Vargas Neumann, J., and Mehta, P.K. (1988). Improving the moisture resistance of adobe structures. Ed. RILEM

### caséine

Didier, L. (2005). Les enduits en terre : synthèse et transmission des savoir-faire dans le cadre du programme européen Leonardo da Vinci. Ed. ENSAG.

### cire

Lemarquis, A. (2008). Etude sur les sols intérieurs en terre crue. Ed. ENSAG.

### eau gluante

Moriset, S., and Yaw Owusu, A. (2009). Reconstruction of the Wa Naa Yiri, Ghana. Ed. CRAterre-ENSAG.

### excréments animaux

Joffroy, T. (2001). Research Project on Traditional Conservation Practices in Africa = Projet de recherche sur les pratiques de conservation traditionnelle en Afrique. Ed. CRAterre-ENSAG

Kéré B (1995). Architecture et cultures constructives du Burkina Faso. Ed. UNESCO.

### gomme arabique

Joffroy, T., and Moriset, S. (1996). Chantiers pilotes de formation à la conservation des mosquées de Tombouctou: Rapport de mission réalisée à Tombouctou, Mali du 22 novembre au 20 décembre 1996. Ed. ICCROM CRAterre-ENSAG UNESCO.

### huile de lin

FAL.ev (2005). M1-D5-I2. In CD "Les Enduits En Terre". Projet Européen Leonardo Da Vinci.

Milési, M., and Riesterer, J. (2012). Les sols en terre. Ed. Terre Vivante.

Rijven T (2008). Entre paille et terre = Between earth and straw. Ed Goutte de Sable.

### fibres fermentées

Togola, T., Sanogo, K., Taxil, G., Sy, M., Carazas Aedo, W., and Siravo, F. (2007a). Compte rendu final des travaux de restauration de la Grande Mosquée de Mopti. Ed. AKTC.

### tanin

Bourgès, A., and Joffroy, T. (2002). Contribution aux recherches pour la préservation d'enduits de terre stabilisés au bitume et de décors polychromes - Cathédrale de Navrongo - Nord Ghana. Ed. ENSAG.

Houben, H. (1996). Recherche sur la stabilisation des enduits (et mortiers) avec du jus d'acacia. Reportage photographique sur une expérimentation empirique menée à Kamboincé (30 kms de

Ouagadougou) au Burkina Faso en 1979 par Hugo Houben. Ed. CRAterre-ENSAG.

Joffroy, T., Savage, D., Kwami, M., and Moriset, S. (1997). Conservation of the "Our Lady of Seven Sorrows cathedral", Navrongo, Ghana. Ed. The Getty Grant Project; GAIA Project; Ghana Museums and Monuments Board

Joffroy, T., Taxil, G., and Moriset, S. (2005). Navrongo - Ghana Conservation of Our Lady of Seven Sorrows - Final report 1996 - 2004. Ed. CRAterre-ENSAG.

Pibot J (2001). Les peintures murales des femmes Kasséna du Burkina Faso. Ed. L'Harmattan

### sang animal

Winkler E. M (1956). The effect of blood on clays.

## mesures d'évaluation

British Standards BSI (1994). EN 413-2:1994 - Methods of Test for Mortar for Masonry : Part 2. Determination of Consistence of Fresh Mortar by Plunger, Water Retention and Air Content. Alcohol Method.

Comité Technique CEN/TC 346 «Conservation des biens culturels» (2010a). NF EN 15802 - Méthodes d'essai - Détermination de l'angle de contact statique.

Comité Technique CEN/TC 346 «Conservation des biens culturels» (2010b). NF EN 15803 - Méthodes d'essai - Détermination de la perméabilité à la vapeur d'eau (dp).

Drdáckỳ, M., Lesák, J., Rescic, S., Slížková, Z., Tiano, P., and Valach, J. (2012). Standardization of peeling tests for assessing the cohesion and consolidation characteristics of historic stone surfaces. Materials and Structures 45, 505–520.

Tiano, P., and Pardini, C. (2008). In Situ Monitoring of Monumental Surfaces: Proceedings of the International Workshop SMW08, 27-29 October 2008. Edifir.

Vandevoorde, D., Pamplona, M., Schalm, O., Vanhellemont, Y., Cnudde, V., and Verhaeven, E. (2009). Contact sponge method: Performance of a promising tool for measuring the initial water absorption. Journal of Cultural Heritage 10, 41–47.

## applicabilité

Joffroy, T., Gandreau, D., Kim, Y.L., (2012). Inventaire de l'architecture de terre du patrimoine mondial = Inventory World Heritage Earthen Architecture. Ed. CRAterre-ENSAG.

Razzokov A., Gandreau D. (2012) Conservation et mise en valeur du site de Sarazm, Tadjikistan. In: Earthen Architecture in today's world: Proceedings of the UNESCO International Colloquium on the Conservation of World Heritage Earthen Architecture, 17-18 December 2012. Ed. UNESCO. Coll. World Heritage papers

Gandreau D., Joffroy T., Kurbanov S., Razzokov A. (2005) Sarazm, plan de gestion 2006 - 2010. UNESCO (Centre du Patrimoine Mondial), Academy of siences of Takikistan, A. Donish history, archaeology and ethnographic Institute, Penjikent archaeological base, historical and archaeological Reserve of Sarazm. Ed. CRAterre-ENSAG

# Remerciements

**Ministère de la culture de la communication**
Secrétariat général,
Service de la coordination des politiques culturelles et de l'innovation,
Département de la recherche, de l'enseignement supérieur et de la technologie
Bureau de la Recherche Architecturale, Urbaine et Paysagère
Département des Affaires Européennes et Internationales

**Communauté Université Grenoble Alpes**
**ENSAG**
**Labex AE&CC**
**Laboratoire CRAterre**
Zakari Bano, Christian Belinga, Wilfredo Carazas Aedo, Mathilde Chamodot, Christèle Chauvin, Basile Cloquet, Patrice Doat, Alexandre Douline, Hubert Guillaud, Hugo Houben, Titane Houben, Thierry Joffroy, Serge Maïni, Olivier Moles, Sébastien Moriset, Bregje Nouwens, Grégoire Paccoud, Murielle Serlet, Marina Trappeniers

**Asterre**
Lydie Didier, Sylvie Wheeler

**Grands Ateliers - amàco**
Fanny Barnier, Gian Franco Noriega, Anne-Marie Meunier, Martin Pointet

**Aga Khan Trust for Culture**
Francesco Siravo

**et aussi**
Cecilia Alderton, Yolanda Aranda, Eckhard Beuchel, Dominique Chancel, Anaïs Chesneau, Laurent Coquemont, Cecilia Doveri, Daniel Duchert, Lazare Eloundou Assomo, Irmela Fromme, Mathieu Lefèbvre, Anne Lemarquis, Kenji Matsuki, Olivier Scherrer, Shinsaku Suzuki, Gisèle Taxil


# Crédits

**De gauche à droite et de bas en haut**

**couverture** Tarig A. Eltom CC BY3.0 I Green CC BY SA 3.0 I S. Moriset/CRAterre-ENSAG I Anaïs Chesneau/amàco - **p. 6** Maya Pic/CRAterre-ENSAG - **p. 9** Courtoisie du Trust Aga Khan pour la Culture - **p. 16** Ben23 CC BY SA 3.0 - **p. 17** Lazare Eloundou/CRAterre-ENSAG - **p. 18-19** Courtoisie du Trust Aga Khan pour la Culture - **p. 20** Aurélie Vissac/amàco I Laetitia Fontaine/CRAterre-ENSAG - **p. 21** Laetitia Fontaine/CRAterre-ENSAG - **p. 22** Laetitia Fontaine et Romain Anger/CRAterre-ENSAG - **p. 23** Sébastien Moriset/CRAterre-ENSAG - **p. 24** Hans Braxmeier CC0 I Lauriane Vissac CC BY I Lauriane Vissac CC BY - **p. 25** Frauke Feind CC0 I Phyllis Flail CC0 - **p. 26-27** Aurélie Vissac/amàco (schémas) Masako Isomura/CRAterre-ENSAG - **p. 28-29** Aurélie Vissac/amàco - **p. 30** Fanny Barnier/amàco I Tarig A. Eltom CC BY 3.0 - **p. 31** Fanny Barnier/amàco - **p. 34** Sanjay Acharya CC BY SA 3.0 I Bertfr CC BY SA 3.0 - **p. 35** Aurélie Vissac/amàco et Martin Pointet/amàco - **p. 36** Marco Schmidt CC BY SA 2.5 I Laetitia Fontaine et Romain Anger/CRAterre-ENSAG - **p. 37** Laetitia Fontaine et Romain Anger/CRAterre-ENSAG - **p. 40** Grégoire Paccoud/CRAterre-ENSAG - **p. 41-43** Aurélie Vissac/amàco - **p. 44** Gisèle Taxil/CRAterre-ENSAG I Hugo Houben/CRAterre-ENSAG - **p. 45** Gisèle Taxil/CRAterre-ENSAG I Laetitia Fontaine et Romain Anger/CRAterre-ENSAG I Gisèle Taxil/CRAterre-ENSAG I Laetitia Fontaine et Romain Anger/CRAterre-ENSAG I Laetitia Fontaine et Romain Anger/CRAterre-ENSAG - **p. 46- 53** Estel Colas/LRMH et Ann Bourgès/LRMH - **p. 54-55** Aurélie Vissac/amàco - **p. 57-61** Estel Colas/LRMH et Ann Bourgès/LRMH - **p. 64-71** David Gandreau/CRAterre-ENSAG - **4e de couverture** Anaïs Chesneau/amàco - **Illustrations** Arnaud Misse/ CRAterre-ENSAG

La stabilisation organique, art de mêler les argiles de la terre avec des molécules du vivant, est une pratique permettant de protéger les parties les plus exposées des bâtiments en terre. Cet ouvrage présente quelques-unes de ces nombreuses recettes que les bâtisseurs traditionnels maîtrisent en divers endroits du monde. Celles-ci sont décrites et commentées : une invitation à les mettre en œuvre mais aussi à les adapter en fonction de ses besoins spécifiques et des ingrédients disponibles. Source d'inspiration pour mener à bien des expérimentations, cet ouvrage présente également des tests permettant d'évaluer les performances des enduits protecteurs obtenus.

Cette brochure est un aperçu des résultats du projet de recherche PaTerre+ qui a rassemblé pendant deux ans des chercheurs du laboratoire CRAterre-ENSAG et du LRMH. Sa réalisation a été possible grâce à l'implication des chercheurs et au soutien financier de l'IDEFI amàco et du Labex AE&CC.






Communauté
UNIVERSITÉ Grenoble Alpes
















Prix : 15 €
ISBN : 978-2-906901-88-9